

Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil Industrial



**Mejora en el proceso de manejo de carbón en una central
de generación termoeléctrica por medio de análisis
estadístico.**

por

Pedro Pablo Vergara Castillo
Johnny Enrique Pieringer Baeza

Tesis para optar al título de

**Ingeniero Civil Industrial
y Grado de
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería**

Prof. Guía Erik Schulze

Enero, 2015

Índice

Índice	2
Glosario	5
Lista de abreviaturas	7
Lista de figuras	10
Lista de Tablas	14
1 Introducción	16
1.1 Resumen Ejecutivo	16
1.2 Objetivo General	16
1.3 Objetivos Específicos	16
1.4 Planteamiento del problema	17
2 Antecedentes	19
2.1 Descripción de una central eléctrica de tipo térmica convencional	19
2.2 Descripción de la central “Ejemplo”	20
2.3 Descripción del mercado eléctrico de Colombia	22
2.4 Antecedentes adicionales	22
2.5 Magnitud del problema	25
3 Marco Teórico	27
3.1 OEE (Overall Equipment Efficiency o Eficiencia General de los Equipos)	27
3.2 Diagrama de Ishikawa	28
3.3 Diagrama de Pareto	29
3.4 Seis Sigma (Six Sigma)	30
3.5 Lean Manufacturing	33
3.6 Matriz a modo de Fallo – FMEA	34
3.7 Matriz de causa y efecto (MDF)	37
3.8 SIPOC	39
3.9 Mapa Flujo de Valor (VSM)	41
3.10 Capacidad de Procesos	44
3.10.1 Índices de capacidad de corto plazo para procesos	45
3.10.2 Índices de capacidad de largo plazo para procesos	48
3.10.3 Restricciones y particularidades para el cálculo de índices de capacidad de proceso ..	49
3.10.4 Consideraciones previas al cálculo de índices de capacidad de procesos	49
3.10.5 Métricas Seis Sigma	50
3.11 Graficas de control	53
3.12 Estudio de Diseño de Experimentos (DOE)	57
3.12.1 Diseño de Experimentos Factoriales	60
4 Metodología utilizada	63
5 Desarrollo del trabajo - Etapa Definir	66
5.1 Situación actual. Factor de utilización (OEE) de la central ejemplo y centrales hidráulicas del grupo	66
5.2 Selección del Proceso a Mejorar	70
5.2.1 Mapa de procesos de empresa generadora	70
5.2.2 Estructura del costo de generación	72
5.2.3 Selección del proceso a mejorar	73
5.3 Identificación de propuestas de mejora en los subprocesos escogidos	73

5.4	Rendimiento actual de la central “Ejemplo” (Línea Base).....	77
5.4.1	Situación actual de costo unitario del carbón	77
5.4.2	Definición de meta a alcanzar para el costo unitario del carbón.....	82
5.4.3	Evaluación del impacto financiero para la reducción del costo unitario del carbón. ...	87
5.4.4	Situación actual de consumo específico de carbón en las unidades de generación. ...	89
5.4.5	Definición de meta a alcanzar para mejorar la eficiencia en el consumo de carbón en cada una de las unidades de generación.	105
5.4.6	Evaluación del impacto financiero para la mejora de eficiencia en el consumo de en cada una de las unidades de generación.	109
5.5	Definición de Proyecto de Mejora de Proceso.	111
6	Desarrollo del trabajo – Etapa Medir	112
6.2	Levantamiento del mapa del proceso.	112
6.2.1	Descripción de las etapas del proceso Gestión del Combustible.	112
6.3	Búsqueda de potenciales causas del problema (x’s).....	117
6.4	Priorización de las principales causas.	121
6.5	Obtención de datos representativos de las potenciales causas (x’s) y del indicador del proyecto (Y).....	123
6.5.1	Pérdidas en el proceso de generación	124
6.5.2	Especificaciones de carbón que requieren las unidades de central “Ejemplo” para la generación	126
6.5.3	Calidades del carbón acordadas con cada proveedor	126
6.5.4	Procedimiento para cálculo de costo variable de combustible.....	130
6.5.5	Resultado de análisis de variables críticas.	130
6.6	Medición de la capacidad actual del proceso para el Costo Unitario del Carbón (Y1). (Análisis efectuado durante el mes de Mayo 2013).	135
7	Desarrollo del trabajo - Etapa Analizar.	142
7.1	Planteamiento y resolución de hipótesis.	142
7.1.1	Análisis de los datos.	142
7.1.2	Planteamiento y Resolución de Hipótesis.	142
7.2	Selección de variables vitales (x’s)	155
8	Desarrollo del trabajo - Etapa Mejorar.	157
8.1	Encontrar el mejor modelo para determinar el impacto cuantitativo de cada x’s.	157
8.1.1	Planteamiento del experimento.	157
8.1.2	Creación de tabla de datos experimentales para las distintas combinaciones o corridas de prueba.....	158
8.1.3	Planificación operacional para el desarrollo del experimento.	159
8.1.4	Resultado del experimento.	163
8.1.5	Análisis gráfico de los resultados del DOE.....	163
8.1.6	Análisis de Varianza (ANOVA). Planteamiento del modelo matemático obtenido.	167
8.1.7	Obtención del ajuste óptimo para el proceso.	170
8.2	Resultado de las variables relevantes post combustión del Carbón.	171
8.3	Obtención del grado de Degradación en el Poder Calorífico del Carbón almacenado a la intemperie en Pilas del Patio de Acopio.	175
8.4	Propuesta de acciones correctivas (Contramedidas) y controles a incorporar al procesos.	178
8.4.1	Plan de acción de para la implantación de acciones correctivas y plan de control de variables críticas.	179

8.5	Evaluaciones económicas, con potenciales beneficios a obtener para la condición del proceso mejorado.....	182
8.5.1	Evaluación económica para Y1: Reducción del costo variable del combustible por medio de la utilización de mezclas de carbón.	183
8.5.2	Evaluación económica para Y2: Reducción del costo variable del combustible, mejorando la eficiencia de las unidades de generación.	193
8.6	Obtención de la disminución potencial del precio de oferta de las unidades de la central Ejemplo como resultado de la implantación de las mejoras.....	197
9	Conclusiones y Recomendaciones.....	199
10	Bibliografía.....	202
11	Anexo N°1. Mapa del Proceso Gestión del Combustible Carbón en la Central “Ejemplo”.....	204
12	Anexo N°2. SIPOC.....	205
13	Anexo N°3. Matriz FMEA	209
14	Anexo N°4. Plan de acción de mejora para la etapa de implantación	214
15	Anexo N°5. Plan de medición y control de variables críticas	218
16	Anexo N°6. Conceptos básicos de estadística descriptiva y probabilidad	221
16.1	Conceptos básicos de estadística descriptiva y probabilidad.	222
16.2	Medidas de tendencia central	223
16.3	Medidas de dispersión o variabilidad	224
16.4	Conceptos básicos de Probabilidad y su relación con los estadísticos.	239
16.4.1	Teorema del límite central.	240
16.4.2	Distribución normal.	240
16.5	Pruebas de Hipótesis.	242
16.6	Prueba “t” para una muestra.	245
16.7	ANOVA.	246
17	Anexo N°7. Principales características y componentes del carbón mineral	253

Glosario

ANOVA: Análisis de la varianza, del acrónimo Analysis of Variance, tiene como objetivo básico la comparación de las medias de más de dos poblaciones y probar su igualdad.

Central térmica: Instalación industrial que tiene por objeto la generación de energía eléctrica que utiliza los recursos térmicos tales como gas, carbón, entre otros como insumo principal.

CDEC: Centro de despacho económico de carga. Institución encargada de operar y coordinar los despachos de energía eléctrica en el sistema de subtransmisión de Chile.

Costo fijo: son aquellos costos que no son sensibles a pequeños cambios en los niveles de actividad de una empresa, sino que permanecen invariables ante esos cambios. Suele relacionarse a los costos fijos con la estructura productiva y por eso suelen ser llamados también **costes de estructura** y utilizados en la elaboración de informes sobre el grado de uso de esa estructura.

Costos variables: Es aquel que se modifica de acuerdo a variaciones del volumen de producción (o nivel de actividad), se trata tanto de bienes como de servicios. Es decir, si el nivel de actividad decrece, estos costos decrecen, mientras que si el nivel de actividad aumenta, también lo hace esta clase de costos.

Derrateo: Disminución de la capacidad de generación y de las características propias de funcionamiento de las máquinas del proceso de generación de una central eléctrica, producto del envejecimiento y que no es recuperable con mantenimiento.

EBITDA: Es un indicador financiero representado mediante un acrónimo que significa en inglés *Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization* (beneficio antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones), es decir, el beneficio bruto de explotación calculado antes de la deducibilidad de los gastos financieros.

Heat Rate: Consumo específico de calor en kcal, que se obtiene de la combustión del carbón para producir energía eléctrica en kWh.

Impacto: Variable que conjuga lo que puede producir una falla en términos económicos.

Lluvia de ideas (“Brainstorming”): Herramienta de trabajo grupal que facilita la generación de ideas originales en un ambiente relajado.

Lógica difusa: Lógica basada en los cuantificadores del lenguaje (ejemplo: mucho, muy, poco).

Mercado SPOT: Mercado eléctrico en el que se transa energía y potencia al precio marginal que el operador del sistema interconectado (CDEC-Chile, XM-Colombia), calcula a intervalos horarios. Las transacciones se llevan a cabo entre generadoras o entre éstas y clientes libres.

SIC: Sistema interconectado central. Corresponde al sistema troncal de subtransmisión de Chile, abarca desde norte a sur, entre Taltal a Chiloé.

SIN: Sistema interconectado nacional de Colombia. Equivalente al SIC en Chile.

Variables difusas: Conjunto de calificadores lingüísticos que miden las variables de entrada de un sistema o proceso, identificando los factores que califican el riesgo de ocurrencia de un modo de falla.

Lista de abreviaturas

ASTM: Norma internacional “American Society for Testing and Materials”, utilizada para clasificar las calidades del carbón.

Black Belt: Se refiere a la formación de personas más profunda y extensa en la metodología de mejora de procesos Seis Sigma. Tiene dos focos principales, el dominio de DMAIC y conocimiento de las técnicas de gestión del cambio.

CE: Consumo específico de calor en kcal, que se obtiene de la combustión del carbón para producir energía eléctrica en kWh.

CDEC: Centro de despacho económico de carga. Operador del sistema eléctrico interconectado central y del norte grande de Chile.

CMg: Costo Marginal. En el mercado SPOT, corresponde el precio ofertado por la última central seleccionada para alcanzar a cubrir la demanda total de energía del sistema eléctrico en un periodo determinado. Este valor es el que se reconoce a todas las centrales seleccionadas para cubrir la demanda del periodo, independiente del valor ofertado por cada una.

COP: Unidad de medida de la moneda de Colombia, correspondiente a pesos colombianos.

CREG: Organismo regulador del sistema eléctrico interconectado nacional de Colombia.

DMAIC: Son los cinco pasos necesarios para definir y mejorar los procesos, productos o servicios. D (Definir), M (Medir), A (Analizar), I (Mejorar), C (Controlar).

DOE: Estudio de Diseño de Experimentos. Un Diseño de Experimento es un set de procedimientos sistemáticos y mediciones que permiten evaluar el efecto de uno o más factores sin la incidencia de variables extrañas o juicios subjetivos.

DPMO: Defectos por millón de oportunidades. Unidad de medición del nivel de calidad de un proceso cuya característica de calidad es tipo Atributo (Bueno, malo o alto, bajo).

FIFO: Concepto de teoría de colas utilizado para definir que el primer insumo en entrar al proceso es el primer insumo en salir del proceso. En el patio o pila de carbón se refiere a que el primer carbón que ingresa a la pila debe ser el carbón que primero se consume para evitar la degradación por efectos medio ambientales durante el periodo de almacenamiento.

FMEA: Análisis Modal de Fallos y Efectos, conocido también como Matriz de Modos de Fallos y Efectos. Es un procedimiento de análisis de fallos potenciales en un sistema de clasificación determinado por la gravedad y por el efecto de los fallos en el sistema o Impacto, cuyo análisis se basa en la lógica y variables difusas utilizando el conocimiento experto de las personas que intervienen en el proceso.

FSI: Free Swelling Index o Índice de Hinchamiento. Índice utilizado para medir el grado de oxidación de un carbón.

GWh: Gigawatts hora. Unidad de medida de la energía eléctrica activa.

HND: Horas no despachadas. Corresponde al periodo total de tiempo, medido en horas, entre dos fechas específicas, en el cual una unidad de generación no generó energía eléctrica, aun estando disponible para hacerlo, debido a que su precio de oferta fue mayor al del mercado.

HHV: Higher Heating Value o Poder Calorífico Superior. Corresponde a la cantidad de energía por unidad de masa liberada en la oxidación de un combustible sólido.

Kcal: Kilocaloría. Una kilocaloría es igual a 1000 calorías y una caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado centígrado.

Kg: Kilogramo. Unidad de medida de masa. Igual a 1000 gramos de masa.

MDF: Matriz de Causa y Efecto. Es una herramienta aplicada a procesos que se utiliza preferentemente para identificar, explorar, cuantificar y desplegar gráficamente y en detalle todas las posibles causas de un problema.

MW: Megawatts, unidad de medida de la potencia eléctrica activa.

MWh: Megawatts hora. Unidad de medida de la energía eléctrica activa.

OEE: Overall Equipment Efficiency o Eficiencia General de los Equipos. Es una razón porcentual que sirve para medir la eficiencia productiva de la maquinaria industrial.

PDCA: método ideado por Walter Shewhart, conocido como ciclo de la mejora continua o ciclo de Demming, considera las etapas básicas para la mejora de un proceso P (Plan/Planificar), D (Do/Hacer), C (Check/Verificar), A (Act/Actuar).

POA: Presupuesto Operativo Anual. Definido y actualizado anualmente por la Gerencia de Planificación y Control de la compañía, a través de un proceso de análisis de la situación actual del negocio, la estrategia definida por la empresa y la priorización de inversiones y gastos en las instalaciones con un horizonte de 9 años.

NOx: Parte las emisiones de una central térmica, que se producen por la combustión del carbón.

RPN: Número de Prioridad del Riesgo, calculado en la FMEA como resultado de multiplicar el índice de Severidad, con el índice de Incidencia y el índice de Detección.

SIC: Sistema interconectado central de Chile. Sistema eléctrico de potencia, compuesto por las centrales eléctricas, líneas de transmisión, subestaciones de transmisión, subestaciones de

enlace con empresas distribuidoras, subestaciones de bajada de empresas distribuidoras, red de media tensión, transformadores de distribución, redes de baja tensión y clientes finales.

SIE: Aplicación computacional del ERP SAP, utilizado por la compañía dueña de la central. Ejemplo como sistema contable y de gestión presupuestal.

SIN: Sistema interconectado nacional de Colombia. Homólogo al SIC en Chile.

SIPOC: Diagrama utilizado para identificar las distintas etapas de un proceso y sus características de calidad traducidas en variables principales de cada etapa. Sus siglas significan S (Proveedor), I (Entrada), P (Proceso), O (salida), C (Cliente).

VACE: Método para medir la Variación del Consumo Específico en una central térmica.
Minitab: Software computacional de herramientas de análisis estadísticos.

VOC: Voz del Cliente. Utilizada para definir límites de especificación de calidad de una característica de calidad de un proceso, producto o servicio.

VSM: Value Stream Map o Mapa de Flujo de Valor. Herramienta gráfica utilizada para mapear un proceso, identificando el flujo de trabajo, el flujo de información y el flujo de materiales. Utilizado para identificar las acciones del proceso que aportan valor y las que no aportan valor según los 8 desperdicios definidos por la metodología LEAN.

XM: Operador del sistema interconectado nacional de Colombia. Homólogo a CDEC en Chile.

Lista de figuras

Figura N° 1. Esquema de una central térmica a carbón.....	20
Figura N° 2. Esquemas con los escenarios actuales para la generación de la central “Ejemplo”.	24
Figura N° 3. Generación en el Sistema Interconectado Nacional Colombia.....	25
Figura N° 4. Ejemplo de Diagrama Espina de Pescado con el Método de las 6 M	29
Figura N° 5. Ejemplo aplicado de Diagrama de Pareto.....	29
Figura N° 6. Ejemplo aplicado de FMEA.	37
Figura N° 7. Pasos N° 1, 2 y 3 de construcción de una matriz MDF.....	38
Figura N° 8. Pasos N° 4 y 5 de construcción de una Matriz Causa y Efecto.....	39
Figura N° 9. Diagrama SIPOC.....	40
Figura N° 10. Ejemplo de Mapa de Proceso utilizando SIPOC.....	40
Figura N° 11. Diagrama de un mapa de valor VSM.....	42
Figura N° 12. Ejemplo aplicado diagrama VSM.....	43
Figura N° 13. Gráfica para procesos de calidad 6 Sigma y 3 Sigma.....	52
Figura N° 14. Gráfica para calidad 3 Sigma y 6 Sigmas con desplazamiento a largo plazo de 1.5 Sigma.....	53
Figura N° 15. Gráfica de control I.....	55
Figura N° 16. Gráfica de Control con datos tendientes al incremento.....	56
Figura N° 17. Gráfica de control con datos que muestran patrones de temporalidad.....	56
Figura N° 18. Ejemplo Aplicado de Gráfica I-MR.....	57
Figura N° 19. Diagrama de descripción de las etapas DMAIC.....	64
Figura N° 20. Descripción de factor de carga.....	67
Figura N° 21. Esquema explicativo de factores asociados a generación.....	67
Figura N° 22. Diagrama de consumos de la central “Ejemplo”. Año 2011.....	69
Figura N° 23. Diagrama de consumos de la central “Ejemplo”. Año 2012.....	69
Figura N° 24. Diagrama de consumos de la central “Ejemplo”. Año 2013.....	70
Figura N° 25. Mapa de proceso de la empresa generadora.....	71
Figura N° 26. Ejemplo explicativo para cálculo del costo variable de generación.....	73
Figura N° 27. Esquema del cálculo de costo variable para la central “Ejemplo”.....	76
Figura N° 28. Histograma con el precio reliquidado del carbón para 1er semestre de 2013. ...	82
Figura N° 29. Gráfica con los resultados con la implementación en los Precipitadores Electrostáticos.....	83
Figura N° 30. Resultados de Poder Calorífico Superior (HHV), producto del aumento en la calidad térmica del carbón.....	84
Figura N° 31. Resultados de Porcentaje de Ceniza, producto del aumento en la calidad térmica del carbón.....	84
Figura N° 32. Gráficas para el Consumo Especifico (CE) y Porcentaje de Inquemados, obtenidos en pruebas de mezclas de carbón en la central “Ejemplo”.....	86
Figura N° 33. Gráficas para NOX y Material Particulado, obtenido en pruebas de mezclas de carbón en la central “Ejemplo”.....	86
Figura N° 34. Fórmula para el cálculo del rendimiento del sistema generación térmica.....	89
Figura N° 35. Histograma para el Consumo Específico de la Unidad N°2.....	94
Figura N° 36. Gráfico I-MR. Para el consumo específico de la Unidad N°2.....	95

Figura N° 37. Histograma para el Consumo Específico de la Unidad N°3.....	95
Figura N° 38. Gráfico I-MR. Para el consumo específico de la Unidad N°3.....	96
Figura N° 39. Histograma para el Consumo Específico de la Unidad N°4.....	96
Figura N° 40. Gráfico I-MR. Para el consumo específico de la Unidad N°4.....	97
Figura N° 41. Histograma para el Consumo Específico de la Unidad N°5.....	97
Figura N° 42. Gráfico I-MR. Para el consumo específico de la Unidad N°5.....	98
Figura N° 43. Diagrama de caja para el Consumo Específico de Unidades 2 – 3 – 4- 5 de la central “Ejemplo”.....	99
Figura N° 44. Diagrama de Pareto producto del análisis de pocos vitales.....	104
Figura N° 45. Curva de consumo de la unidad N°2 de la central “Ejemplo”.....	105
Figura N° 46. Curva de consumo de la unidad N°3 de la central “Ejemplo”.....	106
Figura N° 47. Curva de consumo de la unidad N°4 de la central “Ejemplo”.....	106
Figura N° 48. Curva de consumo de la Unidad N°5 de la central “Ejemplo”.....	107
Figura N° 49. Project Charter asociado al proyecto de mejora.....	111
Figura N° 50. Diagrama de funcionamiento de la central “Ejemplo”.....	116
Figura N° 51. Etapas del proceso de producción de energía de la central “Ejemplo”.....	116
Figura N° 52. Diagrama espina de pescado del proceso.....	120
Figura N° 53. Diagrama de Pareto en función de la variable Y1.....	121
Figura N° 54. Diagrama de Pareto en función de la variable Y2.....	122
Figura N° 55. Histograma para el Poder Calorífico del Carbón de ingreso a la central “Ejemplo”.....	127
Figura N° 56. Capacidad de Proceso para el Poder Calorífico del Carbón de ingreso a la central “Ejemplo”.....	128
Figura N° 57. Histograma para el % de Ceniza del Carbón de ingreso a la central Ejemplo.....	128
Figura N° 58. Capacidad de Proceso para el % de Ceniza del Carbón de ingreso a la central “Ejemplo”.....	129
Figura N° 59. Histograma para el porcentaje de Ceniza del Carbón de ingreso a la central “Ejemplo”.....	130
Figura N° 60. Diagrama de Espina de Pescado para aplicación de mezclas de carbón en la central “Ejemplo”.....	134
Figura N° 61. Capacidad de proceso para el Precio Ponderado del Carbón de ingreso a la central “Ejemplo”.....	136
Figura N° 62. Capacidad de proceso para el Consumo Específico de la Unidad N°2 de la central “Ejemplo”.....	137
Figura N° 63. Capacidad de proceso para el Consumo Específico de la Unidad N°2 de la central “Ejemplo”.....	137
Figura N° 64. Capacidad de proceso para el Consumo Específico de la Unidad N°3 de la central “Ejemplo”.....	138
Figura N° 65. Capacidad de proceso para el Consumo Específico de la Unidad N°3 de la central “Ejemplo”.....	138
Figura N° 66. Capacidad de proceso para el Consumo Específico de la Unidad N4 de la central Ejemplo.....	139
Figura N° 67. Capacidad de proceso para el Consumo Específico de la Unidad N4 de la central Ejemplo.....	139
Figura N° 68. Capacidad de proceso para el Consumo Específico de la Unidad N°5 de la central Ejemplo.....	140

Figura N° 69. Capacidad de proceso para el Consumo Especifico de la Unidad N°5 de la central Ejemplo.....	140
Figura N°70. Gráfico de dispersión de precios pagados a proveedores de carbón.	145
Figura N°71. Gráfica de dispersión para las variables Diferencia de Poder Calorífico Superior (HHV) y la Diferencia de Precio.	146
Figura N° 72. Gráfica de dispersión para las variables Diferencia del Porcentaje de Ceniza (% Cz) y la Diferencia de Precio.	148
Figura N° 73. Gráfica de correlación entre Índice de Hinchamiento (FSI) y Poder Calorífico (HHV).....	151
Figura N° 74. Gráficas de Caja para el análisis de variabilidad en el Índice de Hinchamiento de los distintitos proveedores.	153
Figura N° 75. Porcentaje de aporte de carbón de ingreso para los distintos proveedores.....	153
Figura N° 76. Ejecución de mezcla homogénea de cantidades de distintos proveedores para la conformación de pilas de prueba para el experimento.	161
Figura N° 77. Toma de muestras para análisis de laboratorio y medición de Porcentaje de Ceniza.	161
Figura N° 78. Gráfica de Pareto de los efectos de los factores e interacciones sobre la variable de salida Consumo Especifico.	164
Figura N° 79. Gráfica Normal de Efectos Principales.....	164
Figura N° 80. Gráfica de Efectos Principales. Verificación de linealidad de los efectos utilizando el punto central.	166
Figura N° 81. Gráfica de Interacciones entre los distintos factores.	167
Figura N°82. Gráfica de cubos para obtener el ajuste optimo del proceso.	171
Figura N° 83. Gráfica de Resultado Experimental de Variables de Etapa Post Combustión del Carbón.	173
Figura N° 84. Gráfica de Promedio mensual de precipitaciones en Bogotá-Colombia.	176
Figura N° 85. Gráfica de degradación del poder calorifico superior del carbón acopiado a la intemperie en pilas 1 y 2 de la central.	177
Figura N° 86. Seguimiento propuesto de avance fisico del plan de acción para la implementación de mejoras.	180
Figura N° 87. Ejemplo de gráfica de control de serie de tiempo.	182
Figura N° 88. Evaluación económica para la iniciativa Y1: "Reducción del costo variable de combustible por medio de la utilización de mezclas de Carbón".....	184
Figura N° 89. Esquema de cúpula o techo para cubrir parte del patio de carbón.....	192
Figura N° 90. Evaluación económica para la iniciativa Y2: "Mejora en la eficiencia de las unidades de generación".....	194
Figura N° 91. Ejemplo de Histograma.	228
Figura N° 92. Ejemplo de Histograma con Límites de Especificación de Calidad.....	229
Figura N° 93. Ejemplo de Histograma de un Proceso Centrado y Capaz.	230
Figura N° 94. Ejemplo de Histograma de un Proceso Centrado con Alta Variabilidad.....	230
Figura N° 95. Ejemplo de Histograma de un Proceso Descentrado con Poca Variabilidad. ..	231
Figura N° 96. Ejemplo de Histograma de un Proceso Descentrado y con Alta Variabilidad.	231
Figura N° 97. Ejemplo de Histograma de un Proceso con Distribución Sesgada a la Derecha.	232
Figura N° 98. Ejemplo de Histograma de un Proceso con Distribución Multimodal.	233
Figura N° 99. Ejemplo de Histograma de un Proceso con Distribución Plana.	234

Figura N° 100. Ejemplo de Histograma de un Proceso con Distribución con Acantilados	235
Figura N° 101. Representación de un Diagrama de Caja	237
Figura N° 102. Ejemplo aplicado de diagramas de cajas	238
Figura N° 103. Ejemplo de funciones de densidad de probabilidades normal.....	241
Figura N° 104. Distribución Normal	242
Figura N° 105. Criterios de validación de hipótesis utilizando el Valor-P	243
Figura N° 106. Test de hipótesis que se pueden aplicar según los tipos de variables de entrada y salida.....	244
Figura N° 107. Visualización gráfica de la hipótesis para la prueba “t” de una muestra.....	246
Figura N° 108. Visualización de variación dentro y entre grupos para el cálculo del F.....	248
Figura N° 109. Visualización gráfica las hipótesis para ANOVA	249
Figura N° 110. Ejemplo grafico de regresión lineal utilizando criterio de los mínimos cuadrados	250

Lista de Tablas

Tabla N° 1. Características Nominales de Potencia de la Central "Ejemplo"	21
Tabla N° 2. Fechas de Puesta en Servicio para las Unidades de la Central "Ejemplo"	21
Tabla N° 3. Características técnicas de las unidades de generación central "Ejemplo"	21
Tabla N° 4. Simbología utilizada en un VSM	43
Tabla N° 5. Construcción de una matriz de un diseño de experimento	59
Tabla N° 6. Matriz de un diseño de experimento con replica	59
Tabla N° 7. Planteamiento de factores y niveles de un diseño de experimento.	60
Tabla N° 8. Matriz de un diseño de experimento con el resultado de la variable analizada.	61
Tabla N° 9. Matriz de un diseño de experimento en Minitab16.....	61
Tabla N° 10. Principales contenidos de cada capítulo.....	65
Tabla N° 11. Comparación de niveles de producción central a carbón vs hidráulica.	68
Tabla N° 12. Pagos realizados por carbón en Febrero 2013	79
Tabla N° 13. Pagos realizados por carbón en Marzo 2013	80
Tabla N° 14. Pagos realizados por carbón en Abril 2013	80
Tabla N° 15. Pagos realizados por carbón en Mayo 2013.....	81
Tabla N° 16. Especificaciones técnicas del carbón que debe suministrarse a las calderas de la central "Ejemplo".	84
Tabla N° 17. Equivalencia térmica del kWh	90
Tabla N° 18. Fórmula de cálculo del Consumo Específico.....	90
Tabla N° 19. Datos de consumo específico de las unidades de la central "Ejemplo"	92
Tabla N° 20. Fuente: Procedimiento interno para ejecución del método VACE, perteneciente a la empresa de Energía dueña de la Central Ejemplo.	100
Tabla N° 21. Variaciones máximas permitidas en centrales térmicas.....	101
Tabla N° 22. Registro de Planilla de control de la turbina a vapor	103
Tabla N° 23. Tabulación de las pérdidas informadas para las unidades de la central "Ejemplo".	104
Tabla N° 24. Comparación de los consumos específicos de las Unidades de la central "Ejemplo".	107
Tabla N° 25. Tabulación en términos de calidad Seis Sigma.	108
Tabla N° 26. Matriz causa-efecto del proceso.....	118
Tabla N° 27. Selección de variables según Diagrama de Pareto.....	122
Tabla N° 28. Selección de variables según Diagrama de Pareto.....	123
Tabla N° 29. Tabulación de variables que son pocos vitales.	124
Tabla N° 30. Tabulación de los efectos que conlleva la aplicación de mezclas de carbón. ...	134
Tabla N° 31. Continuación de tabulación de los efectos que conlleva la aplicación de mezclas de carbón.....	135
Tabla N° 32. Resumen de índices de capacidad de proceso para el consumo específico de la central "Ejemplo".	141
Tabla N°33. Clasificación de las variables a analizar.	142
Tabla N° 34. Prueba "T de una muestra" para el poder calorífico del carbón de ingreso de la central Ejemplo.....	143
Tabla N° 35. Prueba "T de una muestra" para el poder calorífico del carbón de ingreso de la central "Ejemplo".	144

Tabla N° 36. Análisis de Regresión entre Delta Precio y Delta Poder Calorífico	147
Tabla N° 37. Análisis de regresión para las variables Delta Precio y Delta Porcentaje de Ceniza.	149
Tabla N° 38. Agrupamiento de los datos usando valores promedios en distintos rangos de Índice de Hinchamiento y Poder Calorífico Superior HHV.	150
Tabla N° 39. Promedios de Valores para Índice de Hinchamiento (FSI) y Poder Calorífico Superior (HHV).	151
Tabla N° 40. Análisis de Regresión para el Poder Calorífico Superior (HHV) y el Índice de Hinchamiento.	152
Tabla N° 41. Clasificación de proveedores respecto a la variabilidad y nivel de Índice de Hinchamiento en las entregas de Carbón a la Central Ejemplo.	154
Tabla N° 42. Definición de Factores y Niveles del experimento.	158
Tabla N° 43. Tabla de pruebas aleatorias a realizar en el experimento.	159
Tabla N° 44. Cantidad de Carbón para conformar pilas para las pruebas experimentales, en función del poder calorífico.	162
Tabla N° 45. Resultado de los efectos de los factores definidos en el experimento, sobre el Consumo Específico de la Unidad de Generación N°5.	163
Tabla N° 46. Modelo matemático para el resultado experimental obtenido.	168
Tabla N° 47. Análisis de Varianza (ANOVA) para el Consumo Específico.	169
Tabla N° 48. Resultado de Variables Relevantes para la Etapa de Post Combustión.	172
Tabla N° 49. Contramedidas propuestas para implementar mejoras que implican transformaciones en las etapas del proceso.	179
Tabla N° 50. Estimación del costo de operación del Patio de Ceniza en COP, con y sin proyecto.	188
Tabla N° 51. Factores de utilización de las unidades de generación para los periodos de evaluación del proyecto.	189
Tabla N° 52. Estimación del costo de operación del Patio de Carbón en COP, con y sin proyecto.	190
Tabla N° 53. Mayores costos de mantenimiento de maquinaria pesada mayor procesamiento de cantidad de carbón.	191
Tabla N° 54. Tabla de flujos de la evaluación económica de la iniciativa Y1: Reducción del costo variable del combustible por medio de la utilización de mezclas de carbón.	193
Tabla N° 55. Tabulación de consumos específicos promedio para cada unidad y costo unitario del carbón.	195
Tabla N° 56. Tabla de cálculo de beneficios económicos de iniciativa de mejora en la eficiencia de las unidades de generación, para cada periodo del horizonte del proyecto.	195
Tabla N° 57. Evaluación económica de la iniciativa Y2: Reducción del costo variable del combustible, mejorando la eficiencia de las unidades de generación.	197

1 Introducción.

1.1 Resumen Ejecutivo.

El mercado eléctrico nacional al igual que el de los países emergentes latinoamericanos, en lo que respecta a la generación de energía eléctrica, es de tipo SPOT, el que consta de precios ofertados por las distintas centrales que son parte de los sistemas de potencia interconectados existentes, esto significa que diariamente cada central presenta un precio de oferta para cada hora del día al organismo operador del sistema eléctrico (CDEC para el caso de Chile, XM en el caso de Colombia), quien toma la decisión de cuáles serán las centrales que entraran en operación el día siguiente en función de la demanda proyectada del sistema interconectado, potencias nominales de las centrales conectadas a dicho sistema y los mejores precios ofertados por cada central.

De éste modo es que las grandes empresas asociadas al rubro de la generación eléctrica compiten en el mercado eléctrico para acaparar el suministro de la energía que demande el sistema interconectado y cubrir también las obligaciones contractuales que tienen con clientes no regulados. Esta es la principal razón por la que cada conglomerado define distintas estrategias para maximizar sus resultados financieros en función de los precios ofertados por cada centro de producción versus los costos de operación asociados.

Para el caso de las centrales térmicas a carbón, la principal variable que afecta los costos de operación y por ende el precio que pueden ofertar, es el costo variable del combustible, el cual constituye más del 50% del costo variable total de generación.

Este trabajo de tesis propone utilizar herramientas de control estadístico para evaluar y proponer mejoras al proceso de provisión, recepción, almacenamiento y consumo del combustible carbón, con el **propósito de reducir los costos** de generación de una central térmica convencional.

1.2 Objetivo General.

Medir, analizar y proponer mejoras para eliminar o reducir fuentes de variación, pérdidas o desperdicio en el actual proceso de manejo del combustible de una central de generación eléctrica a carbón (Central “Ejemplo”), con el fin de lograr eficiencias operativas y económicas del proceso.

1.3 Objetivos Específicos.

- Determinar el impacto de la variabilidad del indicador que mide el resultado de las variables críticas independientes, previamente identificadas, del proceso de recepción, acopio y combustión del Carbón, sobre el costo variable de generación.

- Seleccionar propuestas de mejora para reducir la variabilidad y las fuentes de desperdicio del proceso de recepción, acopio y combustión del Carbón y elaborar un plan de acción para su implantación en la central “Ejemplo”.
- Determinar y cuantificar los potenciales beneficios económicos de implantar las mejoras seleccionadas en el proceso de recepción, acopio y combustión del Carbón.
- Revisar la factibilidad de utilizar la metodología de análisis presentada en este trabajo para su uso en otros procesos industriales.

1.4 Planteamiento del problema.

El tipo de mercado donde compiten las empresas de generación de energía eléctrica exige que estas últimas busquen competir por el menor precio ofertado diariamente y a cada hora, por lo tanto el problema que abordará esta tesis es la pérdida de competitividad de las centrales térmicas como consecuencia del alto costo de generación que estas poseen, que finalmente repercute en un alto precio ofertado con respecto a centrales generadoras de otras tecnologías más económicas y que coexisten en el mismo sistema eléctrico y mercado. Como se mencionó en el resumen ejecutivo, esta tesis se centrará en buscar eficiencias operacionales para reducir el costo variable de generación de una central térmica convencional, cuya variable significativa o de mayor impacto en el resultado, corresponde al costo variable del combustible.

Para el caso de una central eléctrica que tiene como combustible el carbón, el costo variable de éste depende principalmente del costo unitario del mineral, el que dependerá del tipo de carbón que se requiera para cumplir con la especificación de diseño de las calderas respecto a los distintos parámetros de calidad, tales como poder calorífico, porcentaje de ceniza, humedad, granulometría, índice de aglomeración, así como otros parámetros que influyen en las emisiones como el porcentaje de azufre entre otros.

Otra variable importante que impacta en el costo del carbón son los costos de transporte del mineral y el manejo de inventario, lo que junto con el tipo de disposición y acopio influye en el grado de degradación del mineral y en la posibilidad de gestionar mezclas de carbones de diferentes cualidades y calidades, para obtener el combustible óptimo, que permita cumplir con las especificaciones de diseño y cumplir con restricciones de las normativas medioambientales de emisiones cada vez más exigentes.

Otro aspecto importante que debe ser parte del análisis, corresponde al control operacional del proceso de combustión del carbón el cual puede estar automatizado en un alto porcentaje de nuevas centrales térmicas que incorporan monitoreo remoto y automatismos de los sistemas, pero que en algunas centrales antiguas tiene un porcentaje importante de acción manual o humana, lo que requiere de una supervisión e intervención de operadores de los distintos sistemas de la central (Clasificadora del carbón, molinos, calderas, sistema de recirculación de agua-vapor, etc).

Este trabajo de tesis propone analizar el proceso de manejo del combustible, por medio de la aplicación de herramientas de control estadístico en una central eléctrica a carbón, con el

propósito de poder detectar mejoras en el proceso productivo que generen ahorros en los costos de generación.

Para tal efecto se ha escogido efectuar el análisis en una central eléctrica ubicada en la ciudad de Bogotá, Colombia, instalación que pertenece a una de las principales empresas de generación de energía eléctrica de Latinoamérica que por razones de confidencialidad omitiremos su identidad pero que llamaremos “Ejemplo”.

Es importante señalar que como parte del trabajo se ha dispuesto analizar información tal como las cartas de control estadístico con el objeto de evaluar la capacidad del proceso y poder elaborar los mapas de flujos de valor para identificar potenciales desperdicios en cada etapa del proceso, para luego proponer acciones de mitigación de las causas raíces y de reforzamiento de los efectos positivos.

Es parte del análisis mostrar la reducción del costo variable del combustible y con el consecuente aumento del margen de ganancias, producto de la reducción de costos. Situación que podría significar efectuar una reducción importante del precio de oferta de las distintas unidades de generación como parte de una decisión estratégica posterior a los resultados de esta tesis.

2 Antecedentes.

2.1 Descripción de una central eléctrica de tipo térmica convencional.

Una central térmica es una instalación que produce energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, fuel-oil o gas en una caldera diseñada para tal efecto. El funcionamiento de todas las centrales térmicas, o termoeléctricas, es semejante. Se denomina central térmica convencional, cuando el calor de los gases de la combustión del combustible no son reaprovechados por otro ciclo para producir más vapor y generar energía por medio de otra unidad turbina-generator, a estas últimas centrales se les denomina centrales térmicas de ciclo combinado y son de una tecnología más reciente a las térmicas convencionales. (Área de Formación Grupo Endesa, 2013)

En el caso de centrales carboneras, el combustible se almacena en parques o patios adyacentes, algunos techados, semitechados o descubiertos, desde donde se suministra a la central, pasando por un proceso de molienda y pulverización para luego mezclarse con oxígeno en los quemadores de la caldera, en la que se realiza la combustión. Luego de la combustión parte de la ceniza resultante se deposita por gravedad en la parte inferior de la caldera o cenicero, donde luego es extraída por distintos sistemas dependiendo de cada central y la otra parte de la ceniza volátil junto con el resto de los gases resultantes de la combustión es conducida por un sistema de aire forzado hacia un precipitador electrostático, el cual cumple la función de extraer el resto de la ceniza y partículas de metales presentes en los gases, los cuales posteriormente pasan a la chimenea para ser liberados al medio ambiente. (Área de Formación Grupo Endesa, 2013)

El calor generado por la combustión del carbón al interior de la caldera es aprovechado para producir vapor de agua, la cual es previamente tratada químicamente para desmineralizarla y es impulsada por la bomba de alimentación y conducida al interior de una gran cantidad de tubos en forma de serpentín que tapizan las paredes internas de la caldera, hasta una zona denominada hogar, donde se produce la transferencia de calor. (Área de Formación Grupo Endesa, 2013)

El vapor a una presión muy elevada, hace girar los álabes de la turbina, cuyo eje rotor gira solidariamente con el de un generador eléctrico que produce finalmente la energía eléctrica; esta energía se transporta mediante líneas de alta tensión a los centros de consumo. Por su parte, el vapor que sale de la turbina y que ya ha cumplido su tarea de hacer mover los alabes, es enfriado en un condensador y convertido otra vez en agua, la que vuelve a ser bombeada por la bomba de alimentación a los tubos de la caldera, comenzando un nuevo ciclo. (Área de Formación Grupo Endesa, 2013)

Para enfriar el vapor, dependiendo de cada central, se bombea agua cruda a temperatura ambiente, proveniente de pozos, río o el mar, hacia el condensador. Esta agua de enfriamiento no se mezcla en ningún momento con el agua-vapor principal que mueve la turbina, y su función es extraer el calor del vapor que sale de la turbina al interior de tuberías del condensador. El agua cruda caliente es conducida hacia las torres de refrigeración, las cuales

son grandes estructuras que cumplen la función de extraer el calor del agua cruda de enfriamiento proveniente del condensador y sacarlo a atmosfera, para luego verter el agua a una temperatura adecuada a una laguna, rio o mar, dependiendo también de cada central. (Área de Formación Grupo Endesa, 2013)

Para explicar gráficamente lo anterior, en el siguiente esquema se muestran los sistemas principales y las distintas etapas del proceso de una Central a Carbón mencionadas en este punto.

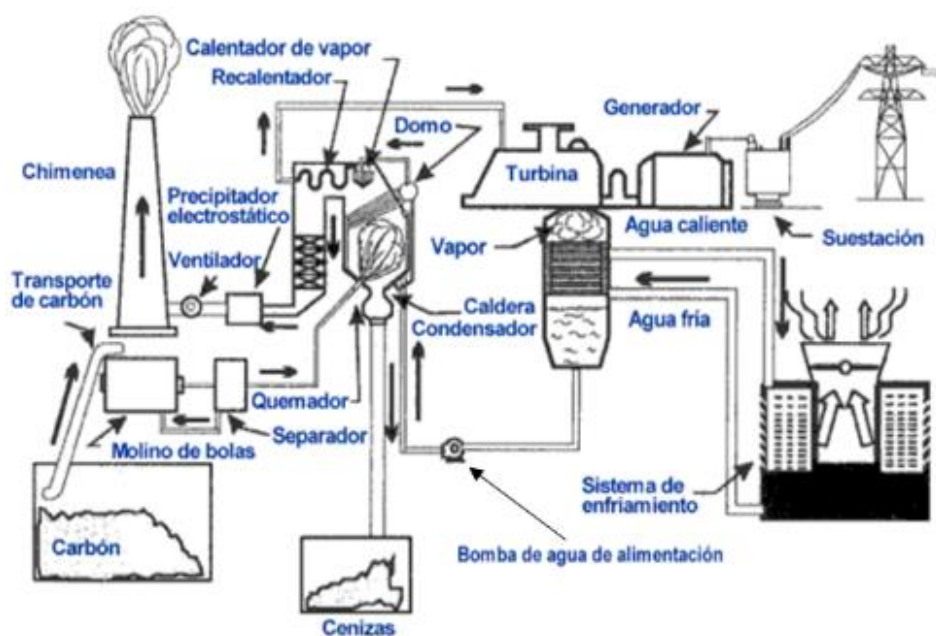


Figura N° 1. Esquema de una central térmica a carbón. (Área de Formación Grupo Endesa, 2013)

2.2 Descripción de la central “Ejemplo”.

Para efectos de éste trabajo utilizaremos un nombre ficticio “Ejemplo”, para presentar una central térmica que está ubicada en la ciudad de Bogotá, Colombia, con el propósito de resguardar la confidencialidad del caso y los datos presentados en el presente documento.

La central “Ejemplo” es de tipo térmica convencional ubicada a 40 km al norte de la ciudad de Bogotá, Colombia, la cual cuenta con 4 unidades de generación, cada una con generador, turbina a vapor y caldera independientes, con una potencia bruta instalada total de 235,5 MW.

Las potencias de cada una de las unidades de generación se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 1. Características Nominales de Potencia de la Central "Ejemplo"

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD 2	UNIDAD 3	UNIDAD 4	UNIDAD 5
Potencia Bruta (MW)	37,5	66	66	66
Potencia Neta (MW)	34	63	64	64
Horas de servicio	136.638	136.285	77.096	43.036

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Distral S.A, 1981) (Hitachi S.A, 1964)

Las horas en servicio corresponden a las horas de generación contabilizadas desde la fecha de puesta en servicio hasta mayo de 2013. Las fechas de entrada en operación de las distintas unidades, son las siguientes:

Tabla N° 2. Fechas de Puesta en Servicio para las Unidades de la Central "Ejemplo"

UNIDAD 2	10 de Diciembre de 1964
UNIDAD 3	21 de Enero de 1976
UNIDAD 4	18 de Marzo de 1981
UNIDAD 5	21 de Junio de 1984

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Distral S.A, 1981) (Hitachi S.A, 1964)

Es importante señalar que la unidad n°2 tiene características distintas de diseño en su caldera, turbina y generador respecto a las otras tres unidades, las que son idénticas en términos de diseño.

Tabla N° 3. Características técnicas de las unidades de generación central "Ejemplo"

	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5
Calderas Central Ejemplo	FWC	Distral, licenciada por FWC		
Presión de vapor sobrecalentado	72 kg/cm ²	106 kg/cm ²		
Temperatura de vapor sobrecalentado	482 °C	513 °C		
Flujo de vapor	156 t/h	276 t/h		
Superficie de intercambio de calor	3424 m ²	5253 m ²		
Temperatura de salida de gases	176 °C	174 °C		
Control de MP	ESP	ESP		
	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5
Turbinas a Vapor Central Ejemplo	G.E	HITACHI		
Presión de vapor	60 kg/cm ²	87.9 kg/cm ²		
Número de etapas	15	13		
Presión del condensador	50.88 mmHg	50.88 mmHg		
Potencia bruta	37.5 MW	68 MW		
Extracciones de vapor	5	5		

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Distral S.A, 1981) (Hitachi S.A, 1964)

Respecto a la oferta en la bolsa de energía eléctrica, cada unidad funciona de manera independiente, es decir están declaradas de cara al operador del sistema eléctrico interconectado nacional (SIN) como generadoras independientes, es por esto que son llamadas a generar de manera independiente y no como un bloque de generación, dependiendo del precio de oferta que declare cada unidad para las 24 horas del día, ya que el despacho de energía se hace para cada periodo coincidentemente con las 24 horas del día.

2.3 Descripción del mercado eléctrico de Colombia.

Colombia es un país que cuenta una hidrología importante en gran parte de su territorio, por tanto su parque generador es mayormente hidráulico, tecnología que es más económica en cuanto a costos de generación en comparación con las de tecnología térmica, por lo tanto el modelo de despacho económico de carga que operador por el XM en SIN, dispone de despachos (Ordenes de generación) en función del precio ofertado (precio que se encuentra bajo el costo marginal para cubrir la demanda del sistema a cada hora del día).

Mayoritariamente las centrales hidráulicas son las centrales que sustentan la base del modelo de despacho, mientras que las centrales térmicas pasan a funcionar como centrales de respaldo y solo son despachadas en caso de riesgos de seguridad del sistema eléctrico o solo en algunos periodos del día, tales como horas puntas y/o por contingencias que ocurran en el mismo, como explicaremos más adelante en el presente trabajo.

2.4 Antecedentes adicionales.

A continuación se entregan antecedentes que explican por qué la empresa generadora requiere buscar eficiencias operacionales enfocadas en la reducción de los costos de generación en las centrales térmicas, abordando algunos propósitos actuales y escenarios posibles de encontrar luego de obtener los resultados de esta tesis.

1. Interés centrado en reducir costos de generación de una central térmica versus la reducción de costos en una central hidráulica perteneciente a la misma empresa.

Las centrales hidráulicas están en su mayoría siempre despachadas por el ente operador del sistema (XM en Colombia), dado su bajo costo de generación, excepto en los periodos de sequía, situación que no es tan probable en el país (Colombia) debido a su alta hidrología.

En el caso de una central hidráulica el problema no es que sea despachada producto de su costo de generación, sino mantenerse disponible u operativa para aprovechar al máximo su fortaleza de bajo costo manteniendo un alto índice de utilización y productividad de las máquinas, tema que no es parte del presente trabajo.

Por el contrario las centrales térmicas tienen pocos pedidos de generación o despacho, por lo que poseen bajo índice de utilización o productividad respecto a la energía que teóricamente podrían generar en un periodo de tiempo, y adicionalmente estas últimas poseen procesos productivos más robustos que las centrales hidráulicas, debido a que el proceso

termodinámico es mucho más complejo y con mayores etapas previas a la generación de energía eléctrica respecto a la tecnología hidráulica y por tanto tiene mayores costos asociados a la operación y mantenimiento de mayor infraestructura de cada etapa del proceso.

2. Mejorar la eficiencia operativa de una central térmica que tiene baja productividad.

Para esto hay que comprender como funciona el mercado SPOT, el cual es el modelo implementado en casi todos los sistemas eléctricos de los países de América Latina, con mínimas variaciones.

En estos mercados las centrales eléctricas ganan su concesión de generación para su potencia instalada hasta por 40 años y una vez puestas en servicio y conectadas al sistema eléctrico nacional reciben básicamente dos tipos de ingresos y aunque el modo de compensación es mucho más complejo, se puede resumir en un primer tipo de compensación denominado “Cargo por confiabilidad”, para el caso de Colombia o “Potencia Firme” en el caso de Chile, el que es reconocido solo porque la central se encuentre disponible en todo momento en caso que sea requerida por el Sistema Eléctrico Interconectado (SIN en el caso de Colombia), y cuyo espíritu es cubrir los costos asociados; el otro ingreso que reciben las empresas generadoras es por la energía efectivamente generada e inyectada al Sistema Eléctrico Interconectado por todo el conjunto de centrales conectadas que son de su propiedad, lo cual depende de que las centrales sean “despachadas” por el ente regulador del sistema, que en el caso de Colombia corresponde al XM.

Al tener características de central de respaldo, las centrales térmicas toman importancia en temporadas de poca hidrología, es decir cuando las centrales hidráulicas aumentan su precio de oferta debido a escasez de agua en los embalses, es aquí donde las empresas eléctricas que tienen centrales térmicas en su parque generador sacan ventaja ya que estas pasan a ser despachadas por mérito (precio menor al marginal del modelo de despacho económico de carga), por tanto les es más conveniente cubrir los contratos vigentes con clientes con la energía generada por sus propias centrales térmicas, en comparación con el caso en que debido a no tener centrales térmicas, deban comprar en la bolsa la energía que necesitan para cubrir sus contratos a un precio mucho mayor.

Con lo explicado anteriormente, la hipótesis que se plantea es que disminuyendo los costos de generación en centrales térmicas se abren dos escenarios posibles:

1. El primer escenario se puede dar con la posibilidad de aumentar las ventas de energía al reducir el precio de oferta, producto de la decisión estratégica de traspasar el beneficio de reducción de costo de generación al cliente final, es decir una estrategia de mercado más competitiva, logrando mayores despachos.

Lo anterior debe ser analizado y contrastado con la afectación de la reducción del precio en la utilidad y una mayor inversión para asegurar y mejorar la disponibilidad de las máquinas actualmente antiguas y no caer en una decisión contraproducente que implique

conseguir mayores despachos o pedidos pero con máquinas deterioradas y cada vez más indisponibles, lo cual generaría grandes pérdidas para el negocio, como consecuencia de multas y hasta pérdida de la concesión de la central.

2. El segundo escenario se daría al aumentar el margen variable de la compañía producto del menor costo de generación, sin aumentar las ventas de energía y manteniendo el mismo precio de oferta. Este segundo escenario es atractivo en un mayor grado en centrales con sistemas y tecnologías antiguas, poco automatizadas, donde se requiere una gran cantidad de personal especialista por tanto un costo importante para la operación respecto a centrales modernas con sistemas productivos automatizados.

Al inicio de este estudio, es imposible evaluar cuantitativamente cuál de estos dos escenarios es más conveniente para el resultado operacional de la empresa, aunque sabemos que el primero es el que posee un mayor riesgo operacional debido a posibles castigos en la pago por confiabilidad por parte del regulador, asociado a un aumento de la frecuencia y gravedad de fallas, relacionadas con mayores horas de operación de unidades cuyos componentes son antiguos, pero así también sabemos que si se logra mitigar el riesgo por medio de inversiones direccionadas a recuperar o reemplazar los componentes más críticos, es el escenario que podría reportar el mejor resultado operacional ya que es el único que buscaría aumentar las ventas debido al menor precio de oferta que se podría declarar al operador del sistema interconectado, lo cual sería una decisión estratégica de la compañía.

En cuanto al segundo escenario, sabemos que traerá beneficios operacionales sin aumentar el riesgo operacional, tomando una postura más conservadora y solo buscando la mejora por medio de la reducción de costos, sin velar por aumento en las ventas o a obtener mayores ingresos. Ambos escenarios se muestran de manera didáctica en el siguiente esquema.

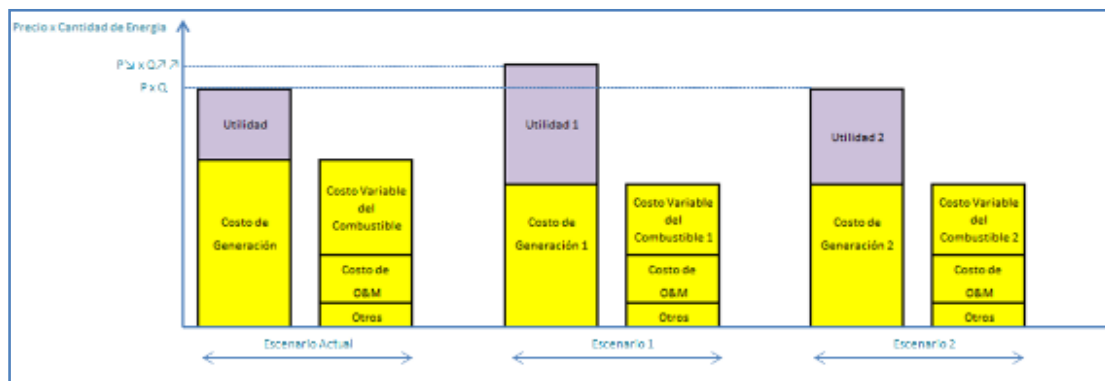


Figura N° 2. Esquemas con los escenarios actuales para la generación de la central “Ejemplo”.
(Elaboración propia, 2014)

Es importante mencionar en esta etapa que, dado a que la central “Ejemplo” es una central antigua con baja automatización de los procesos productivos, esta tesis se enfocará en

segundo escenario, buscando iniciativas de mejora operacionales orientadas a **reducir costos de generación**.

Al final de este estudio podremos entregar una evaluación cuantitativa de este último supuesto, dejando abierta la posibilidad para que luego de implantadas las mejoras operacionales propuestas, la empresa pueda evaluar las inversiones necesarias para mitigar riesgos asociados y decidir aceptar o rechazar la opción del primer escenario.

2.5 Magnitud del problema.

De lo señalado en los puntos 2.3 y 2.4 se puede deducir que debido a las características climáticas propias del país (Colombia) el cual tiene una buena hidrología en gran parte de su territorio, hace que las centrales carboneras sean consideradas como centrales de respaldo, es decir que no son llamadas a generar gran parte del tiempo por el operador del sistema eléctrico interconectado. En este punto se analiza con mayor detalle este aspecto, con el propósito de cuantificar la participación de mercado de las distintas tecnologías, lo cual tiene una relación indirectamente proporcional con los costos de generación.

Con los datos históricos disponibles en el portal web del operador del sistema eléctrico interconectado de Colombia, podemos observar que el aporte del parque hidráulico comprende aproximadamente al 72% del total de la energía inyectada al SIN, mientras que el parque térmico solo al 22%.



Figura N° 3. Generación en el Sistema Interconectado Nacional Colombia. Datos mensuales desde Enero 2012 a Abril 2013 (Operación del Sistema Interconectado Nacional Colombiano, 2013)

Con éste antecedente se evidencia que las centrales térmicas abarcan un porcentaje menor de toda la generación inyectada al sistema interconectado nacional, lo cual es debido básicamente a la menor potencia instalada de este tipo de tecnología y a sus altos costos de generación, lo cual hace que este tipo de centrales sea poco demandada por el operador del sistema. La inyección de energía al SIN por parte de las centrales carboneras depende de factores tales como, contingencias temporales en el sistema eléctrico producto de fallas en líneas de transmisión o algún componente, o indisponibilidad de alguna de las centrales base (hidráulicas), así como luego de resultados de estudios o simulaciones que ejecute de manera

preventiva el operador del sistema que arrojen un alto riesgo de déficit de aportes de energía ante circunstancias especiales de operación del sistema eléctrico.

3 Marco Teórico.

Es parte de este trabajo de tesis efectuar un análisis estadístico del proceso productivo del consumo del carbón de una central termoeléctrica con el propósito de determinar valores objetivos de algunos parámetros de importancia y con ello se pueda efectuar un análisis de la eficiencia del proceso de almacenamiento y consumo del combustible.

Para ello en este capítulo repasaremos el fundamento teórico de las herramientas de tipo estadístico y análisis de procesos más importantes que se utilizarán en este trabajo de tesis.

Debido a que la cantidad de conceptos estadísticos es demasiado extensa, hemos incorporado en los anexos N°6 y N°7, los conceptos básicos de estadística descriptiva y probabilidad, así como los componentes y características principales del carbón mineral que son utilizados en los análisis estadísticos.

3.1 OEE (Overall Equipment Efficiency o Eficiencia General de los Equipos).

El OEE es una razón porcentual que sirve para medir la eficiencia productiva de la maquinaria industrial. (Lean Roots, 2013)

La ventaja del métrico OEE frente a otras razones o ratios es que mide, en un único indicador, todos los parámetros fundamentales en la producción industrial: la disponibilidad, la eficiencia y la calidad. (Lean Roots, 2013)

Tener un OEE de, por ejemplo, el 40%, significa que de cada 100 piezas buenas que la máquina podría haber producido, sólo ha producido 40.

Se dice que engloba todos los parámetros fundamentales, porque del análisis de las tres razones que forman el OEE, es posible saber si lo que falta hasta el 100% se ha perdido por disponibilidad (la maquinaria estuvo cierto tiempo parada), eficiencia (la maquinaria estuvo funcionando a menos de su capacidad total) o calidad (se han producido unidades defectuosas). (Lean Roots, 2013)

En una central eléctrica, esta herramienta sirve para detectar principales causas de pérdidas o de no aprovechamiento de la energía posible de generar, una vez que los parámetros fundamentales de la de la producción (Disponibilidad, eficiencia y calidad), son aperturados en las distintas causas que los afectan como por ejemplo Disponibilidad: Energía no generada por fallas internas o energía no generada por fallas externas, haciendo posible observar las principales causas de pérdidas de energía y con esto último la priorización de acciones de mejora sobre las principales causas.

Cálculo del OEE.

El OEE resulta de multiplicar otras tres razones porcentuales: la Disponibilidad, la Eficiencia y la Calidad. (Lean Roots, 2013)

$$OEE = Disponibilidad * Rendimiento * Calidad$$

3.2 Diagrama de Ishikawa

El **diagrama de Ishikawa**, también llamado **diagrama de espina de pescado**, **diagrama de causa-efecto**, **diagrama de Grandal** o **diagrama causal**, se trata de un diagrama que consiste en una representación gráfica sencilla en la que puede verse de manera relacional una especie de espina central, que es una línea en el plano horizontal, representando el problema a analizar, que se escribe a su derecha. (Dávila, 2004, págs. 86-87)

Este diagrama causal es la representación gráfica de las relaciones múltiples de causa - efecto entre las diversas variables que intervienen en un proceso. (Dávila, 2004, págs. 86-87)

El problema analizado puede provenir de diversos ámbitos como la salud, calidad de productos y servicios, fenómenos sociales, organización, etc. A este eje horizontal van llegando líneas oblicuas -como las espinas de un pez- que representan las causas valoradas como tales por las personas participantes en el análisis del problema. A su vez, cada una de estas líneas que representa una posible causa, recibe otras líneas perpendiculares que representan las causas secundarias. Cada grupo formado por una posible causa primaria y las causas secundarias que se le relacionan forman un grupo de causas con naturaleza común. Este tipo de herramienta permite un análisis participativo mediante grupos de mejora o grupos de análisis, que mediante técnicas como por ejemplo la lluvia de ideas, sesiones de creatividad, y otras, facilita un resultado óptimo en el entendimiento de las causas que originan un problema, con lo que puede ser posible la solución del mismo. (Dávila, 2004, págs. 86-87)

El tipo de diagrama más utilizado es que propone como causas principales las 6 causas principales de variabilidad en los procesos, denominadas como 6 M: Maquinas, Métodos, Medio Ambiente, Sistema de Medición, Personas (Mano de obra) y los Materiales. (Dávila, 2004, págs. 86-87)

Esta herramienta es útil para encontrar causas raíces en de la variación del proceso, como por ejemplo, en una central térmica convencional “Variación del consumo específico del combustible”. (Dávila, 2004, págs. 86-87)

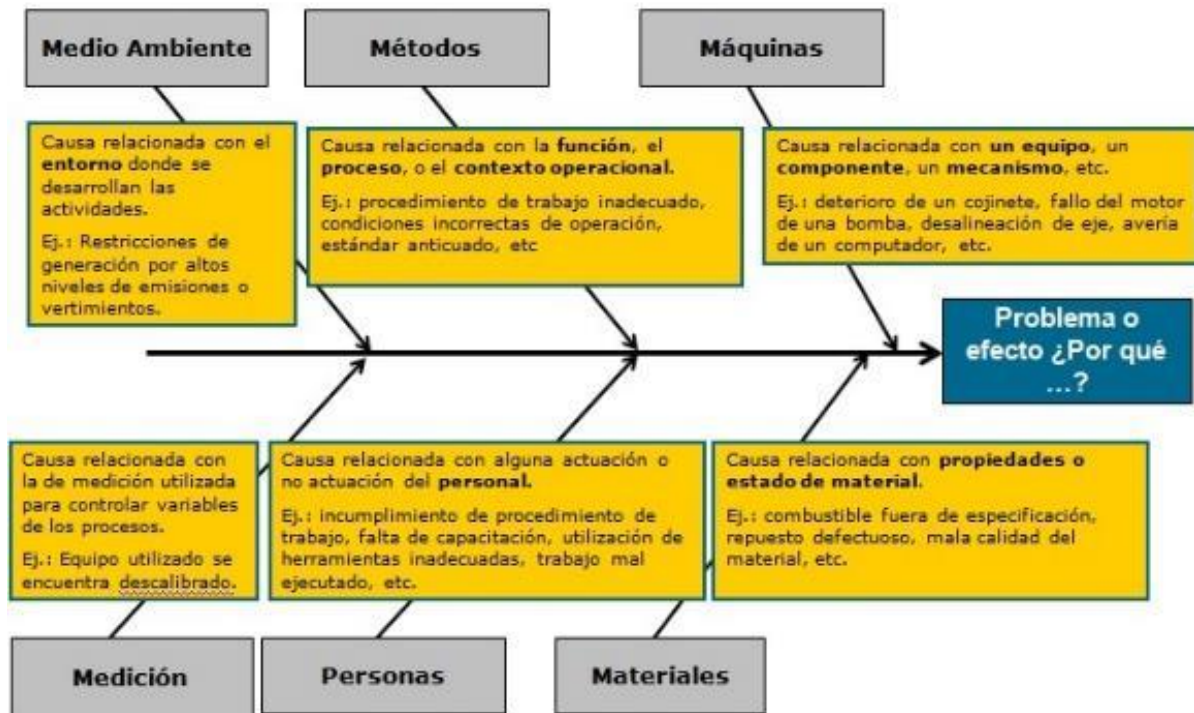


Figura N° 4. Ejemplo de Diagrama Espina de Pescado con el Método de las 6 M. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Dávila, 2004, págs. 86-87)

3.3 Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto, también llamado curva cerrada o Distribución A-B-C, es una gráfica para organizar datos de forma que estos queden en orden descendente, de izquierda a derecha y separados por barras. Permite asignar un orden de prioridades. (Dávila, 2004, págs. 82-85)

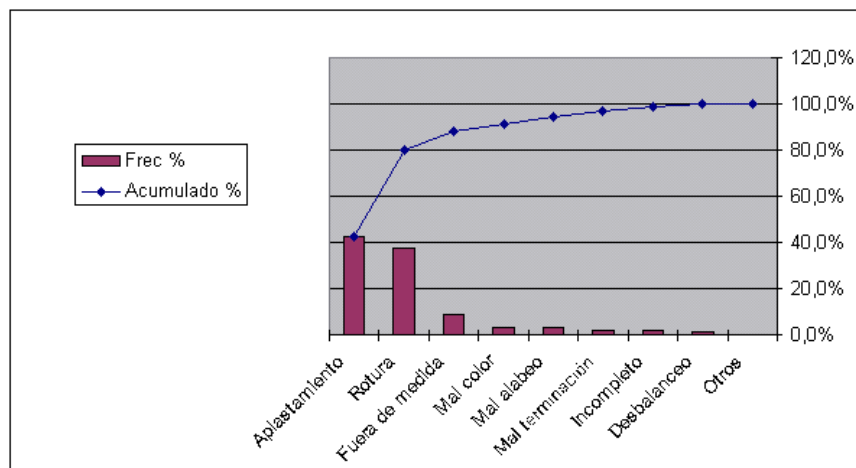


Figura N° 5. Ejemplo aplicado de Diagrama de Pareto. (Elaboración propia, 2014)

El diagrama permite mostrar gráficamente el principio de Pareto, que de manera resumida indica que hay pocas causas que originan o explican gran parte del problema y que hay muchas causas que poco explican el origen del problema o que inciden en menor grado en los resultados que se desean controlar. Mediante la gráfica colocamos los "pocos que son vitales" a la izquierda y los "muchos triviales" a la derecha. (Dávila, 2004, págs. 82-85)

El diagrama facilita el estudio de las fallas en las industrias o empresas comerciales, así como fenómenos sociales o naturales psicosomáticos, como se puede ver en el siguiente ejemplo. Hay que tener en cuenta que tanto la distribución de los efectos como sus posibles causas no es un proceso lineal sino que el 20% de las causas totales hace que sean originados el 80% de los efectos. (Dávila, 2004, págs. 82-85)

El principal uso que tiene el elaborar este tipo de diagrama es para poder establecer un orden de prioridades en las causas de variación o desperdicio en el proceso o para priorizar el impacto de los factores analizados sobre una variable dependiente (Y) que corresponde al resultado del proceso, como por ejemplo en una central térmica "Consumo específico de combustible". (Dávila, 2004, págs. 82-85)

3.4 Seis Sigma (Six Sigma).

Es una metodología de mejora de procesos y un modelo de gestión, centrada en la reducción de la variabilidad de los mismos, por medio de la eliminación de los defectos o fallas en la entrega de un producto o servicio al cliente. La meta de 6 Sigma es llegar a un máximo de 3,4 defectos por millón de eventos u oportunidades (DPMO), entendiéndose como defecto cualquier evento en que un producto o servicio no logra cumplir los requisitos del cliente. (Molteni Raúl, 2008)

Seis sigma utiliza herramientas estadísticas para la caracterización y el estudio de los procesos, de ahí el nombre de la herramienta, ya que sigma es la desviación típica que da una idea de la variabilidad en un proceso y el objetivo de la metodología seis sigma es reducir ésta de modo que el proceso se encuentre siempre dentro de los límites establecidos por los requisitos del cliente. (Molteni Raúl, 2008)

Obtener 3,4 defectos en un millón de oportunidades es una meta bastante ambiciosa pero lograble. Se puede clasificar la eficiencia de un proceso con base en su nivel de sigma:

- 1 sigma= 690.000 DPMO = 31% de eficiencia
- 2 sigma= 308.538 DPMO = 69% de eficiencia
- 3 sigma= 66.807 DPMO = 93,3% de eficiencia
- 4 sigma= 6.210 DPMO = 99,38% de eficiencia
- 5 sigma= 233 DPMO = 99,977% de eficiencia
- 6 sigma= 3,4 DPMO = 99,99966% de eficiencia

Porcentajes obtenidos asumiendo una desviación del valor nominal de 1,5 sigma. (Molteni Raúl, 2008)

Cómo modelo de gestión para la mejora continua, seis sigma tiene principios orientados a alcanzar la excelencia operacional de los procesos con el propósito de aumentar la satisfacción de los clientes y asegurar el crecimiento rentable de la organización, impulsando el alineamiento entre los objetivos estratégicos de la empresa con los objetivos de resultados operacionales de los procesos, apoyándose en el liderazgo comprometido desde la alta dirección hasta la última línea organizativa, estableciendo una estructura directiva para desarrollar proyectos, que incluye la creación de equipos interdisciplinarios, conformados por personas previamente entrenadas y acreditadas en las distintas herramientas y habilidades necesarias que se requieren para cumplir las distintas funciones que propone el modelo. (Molteni Raúl, 2008)

Principios de Six Sigma (Molteni Raúl, 2008)

- **Liderazgo comprometido de arriba hacia abajo.** Esta metodología implica un cambio en la forma de realizar las operaciones y de tomar decisiones. La estrategia se apoya y compromete desde los niveles más altos de la dirección y la organización.
- **Seis Sigma se apoya en una estructura directiva que incluye personal a tiempo completo.** La forma de manifestar el compromiso por Six Sigma es creando una estructura directiva que integre líderes de negocio, de proyectos, expertos y facilitadores. Cada uno de los líderes tiene roles y responsabilidades específicas para formar proyectos de mejora.
- **Entrenamiento.** Cada uno de los actores del programa de Seis Sigma requiere de un entrenamiento específico. Varios de ellos deben tomar un entrenamiento amplio, que requiere una acreditación conocida como black belt.
- **Orientada al cliente y enfocada a los procesos.** Esta metodología busca que todos los procesos cumplan con los requerimientos del cliente y que los niveles de calidad y desempeño cumplan con los estándares de Six Sigma. Al desarrollar esta metodología se requiere profundizar en el entendimiento del cliente y sus necesidades. Con base en ese estudio sobre el cliente se diseñan y mejoran los procesos.
- **Dirigida con datos.** Los datos y el pensamiento estadístico orientan los esfuerzos de esta metodología. Los datos son necesarios para identificar las variables de calidad y los procesos y áreas que tienen que ser mejorados.
- **Se apoya en un método científico.** Se requiere de una metodología para resolver los problemas del cliente, a través del análisis y tratamiento de los datos obtenidos.
- **Los proyectos generan ahorros o aumento en ventas.**
- **El trabajo se reconoce.**
- **La metodología Six Sigma plantea proyectos.** Seis Sigma es un modelo con horizonte de varios años, con lo cual integra y refuerza otros tipos de iniciativas.
- **Seis Sigma se comunica.** Los programas de seis sigma se basan en una política intensa de comunicación entre todos los miembros y departamentos de una organización, y fuera de la organización. Con esto se adopta esta filosofía en toda la organización.

Etapas para el desarrollo de proyectos (DMAIC) (Molteni Raúl, 2008)

El proceso de desarrollo de la metodología **Seis Sigma** (six sigma) se caracteriza por 5 etapas concretas:

- **Definir**, que consiste en concretar el objetivo del problema o defecto y validarlo, a la vez que se definen los participantes del programa.
- **Medir**, que consiste en entender el funcionamiento actual del problema o defecto.
- **Analizar**, cuyo propósito es identificar y demostrar matemáticamente la incidencia de las causas reales del problema o defecto.
- **Mejorar**, que permite determinar las mejoras procurando minimizar la inversión a realizar.
- **Controlar**, que se basa en tomar medidas con el fin de garantizar la continuidad de la mejora y valorarla en términos económicos y de satisfacción del cliente.

Funciones y responsabilidades en Six Sigma (Molteni Raúl, 2008)

Para la implementación de Six Sigma se deben seguir las siguientes prácticas de personal:

- Líderes ejecutivos comprometidos con Six Sigma y que promuevan en toda la organización sus actividades. Líderes que se apropien de los procesos que deben mejorarse.
- Capacitación corporativa en los conceptos y herramientas de Six Sigma.
- Determinación de la dificultad de los objetivos de mejoramiento.
- Refuerzo continuo y estímulos.

Estructura organizativa de Six Sigma (Molteni Raúl, 2008)

La estructura organizativa de Six Sigma se compone de:

- **Director Six Sigma**: Define los objetivos estratégicos del programa, las responsabilidades, selecciona los proyectos y los equipos que formarán parte de él, de acuerdo con el objetivo. También comunica y difunde el programa.
- **Altos directivos (Champions)**: Son los directores de área quienes proveen la dirección estratégica y recursos para apoyar a los proyectos por realizar.
- **Maestros Cinta Negra (Master black belts)**: No siempre existen. Personal seleccionado y capacitado, que ha desarrollado rol de Black Belt, el cual coordina, capacita y dirige a los black belts de la organización, por lo tanto son buenos conocedores de la metodología con amplia experiencia en el campo.
- **Black belts**: Expertos técnicos que generalmente se dedican a tiempo completo a la metodología Six Sigma. Son los que asesoran, lideran proyectos y apoyan en mantener una cultura de mejora de procesos. Se encargan de capacitar a los Green Belts. También tienen la obligación de encontrar y proponer mejoras.

- Green belts: Expertos técnicos que se dedican en forma parcial a actividades de Six Sigma. Se enfocan en actividades cotidianas diferentes de Six Sigma pero participan o lideran proyectos para atacar problemas de sus áreas.

Esta metodología es utilizada cuando se requiere reducir la variabilidad o cuando se requiere central un proceso, respecto a las especificaciones de calidad acordadas con el cliente, con el propósito de eliminar los defectos y así cumplir y asegurar el cumplimiento características de calidad. Sus principios y herramientas tienen sus bases en el análisis estadístico de procesos por tanto se basa en hechos concretos cuyas hipótesis han sido demostradas estadísticamente.

3.5 Lean Manufacturing

Lean manufacturing (‘**producción ajustada**’, ‘**manufactura esbelta**’, ‘**producción limpia**’ o ‘**producción sin desperdicios**’) es un modelo de gestión enfocado a la creación de flujo para poder entregar el máximo valor para los clientes, utilizando para ello los mínimos recursos necesarios: es decir *ajustados* (lean en inglés). (Cuatrecasas, 2010)

La creación de flujo (Proceso ágil), se focaliza en la reducción de los ocho tipos de "desperdicios" en productos manufacturados (Cuatrecasas, 2010):

- sobre-producción
- tiempo de espera
- transporte
- exceso de procesados
- inventario
- movimientos
- defectos
- potencial humano subutilizado

Eliminando los *desperdicios* (Muda en japonés), se mejora la calidad y se reducen el tiempo de producción y el costo. Las herramientas *lean*, incluyen grupos y actividades continuas de análisis (llamadas *kaizen* en japonés), producción *pull* (‘el pedido del cliente tira al proceso y no el proceso empuja lo que se entrega al cliente’, en el sentido del término japonés *kanban*), y elementos y procesos *a prueba de fallos* (*poka yoke*, en japonés), todo con foco en lo que ocurre en el *gemba*, lo que en japonés significa *lugar de trabajo*. (Cuatrecasas, 2010)

Los principios clave del **lean manufacturing** son (Cuatrecasas, 2010):

- Calidad perfecta a la primera: búsqueda de cero defectos, detección y solución de los problemas en su origen.
- Minimización del despilfarro: eliminación de todas las actividades que no son de valor añadido, optimización del uso de los recursos escasos (capital, gente y espacio).

- Mejora continua: reducción de costes, mejora de la calidad, aumento de la productividad y compartir la información.
- Procesos "pull": los productos son tirados (en el sentido de solicitados) por el cliente final, no empujados por el final de la producción.
- Flexibilidad: producir rápidamente diferentes mezclas de gran variedad de productos, sin sacrificar la eficiencia debido a volúmenes menores de producción.
- Construcción y mantenimiento de una relación a largo plazo con los proveedores tomando acuerdos para compartir el riesgo, los costes y la información.

Lean es básicamente todo lo concerniente a obtener las cosas correctas en el lugar correcto, en el momento correcto, en la cantidad correcta, minimizando el despilfarro, siendo flexible y estando abierto al cambio. (Cuatrecasas, 2010)

La principal bondad de esta metodología es lograr un flujo ágil del proceso (materiales, información, trabajo), de manera de entregar solo que el cliente solicita en el momento adecuado y utilizando los mínimos recursos para cumplir las especificaciones de calidad acordadas. Sus principios y herramientas tienen sus bases en el análisis y perfeccionamiento del lugar donde se realiza el trabajo o GEMBA en japonés, por lo tanto son de uso práctico y lógico. (Cuatrecasas, 2010)

3.6 Matriz a modo de Fallo – FMEA

El **análisis modal de fallos y efectos (AMFE en español)** es un procedimiento de análisis de fallos potenciales en un sistema, de clasificación determinada por la gravedad o por el efecto de los fallos en el sistema. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Las causas de los fallos pueden ser cualquier error o defecto en los procesos o diseño, especialmente aquellos que afectan a los consumidores, y pueden ser potenciales o reales. El término análisis de efectos, hace referencia al estudio de las consecuencias de esos fallos. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Implementación. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

En un AMFE, se otorga una prioridad a los fallos dependiendo de cuan serias sean sus consecuencias, la frecuencia con la que ocurren y con qué dificultad pueden ser localizadas. Un AMFE también documenta el conocimiento existente y las acciones sobre riesgos o fallos que deben ser utilizadas para lograr una mejora continua. El AMFE se utiliza durante la fase de diseño para evitar fallos futuros. Posteriormente es utilizado en las fases de control de procesos, antes y durante estos procesos. Idealmente, un AMFE empieza durante los primeros niveles conceptuales del proyecto y continúa a lo largo de la vida del producto o servicio.

La finalidad de un AMFE es eliminar o reducir los fallos, comenzando por aquellos con una prioridad más alta. Puede ser también utilizado para evaluar las prioridades de la gestión del riesgo. El AMFE ayuda a seleccionar soluciones que reducen los impactos acumulativos de las consecuencias del ciclo de vida (riesgos) del fallo de un sistema (fallo).

Antes de comenzar el AMFE debe crearse una hoja de trabajo con las necesidades y que contenga la información importante sobre el sistema como fecha de revisión o nombre de los componentes. En esta hoja de trabajo todos los ítems o funciones o el título deben ser listados de una forma lógica, basada en diagramas de bloque.

Paso 1: Severidad (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Determinar todos los modos de fallos basados en los requerimientos funcionales y sus efectos. Ejemplos de modos de fallos son: cortocircuitos eléctricos, corrosiones o deformaciones.

Es importante apuntar que un fallo en un componente puede llevar a un fallo en otro componente de fallos debe ser listado en términos técnicos y por función. Así, el efecto final de cada modo de fallo debe tenerse en cuenta. Un efecto de fallo se define como el resultado de un modo de fallo en la función del sistema percibida por el usuario. Por lo tanto es necesario dejar constancia por escrito de estos efectos tal como los verá o experimentará el usuario. Ejemplos de efectos de fallos son: rendimiento bajo, ruido y daños a un usuario. Cada efecto recibe un número de severidad (S) que van desde el 1 (sin peligro) a 10 (crítico). Estos números ayudarán a los ingenieros a priorizar los modos de fallo y sus efectos. Si la severidad de un efecto tiene un grado 9 o 10, se debe considerar cambiar el diseño eliminando el modo de fallo o protegiendo al usuario de su efecto. Un grado 9 o 10 está reservado para aquellos efectos que causarían daño al usuario.

Paso 2: Incidencia (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

En este paso es necesario observar la causa del fallo y determinar con qué frecuencia ocurre. Esto puede lograrse mediante la observación de productos o procesos similares y la documentación de sus fallos. La causa de un fallo está vista como un punto débil del diseño. Todas las causas potenciales de modo de fallos deben ser identificadas y documentadas utilizando terminología técnica. Ejemplos de causas son: algoritmos erróneos, voltaje excesivo o condiciones de funcionamiento inadecuadas.

Un modo de fallos recibe un número de probabilidad (O) que puede ir del 1 al 10. Las acciones deben desarrollarse si la incidencia es alta (>4 para fallos no relacionados con la seguridad y >1 cuando el número de severidad del paso 1 es de 9 o 10). Este paso se conoce como el desarrollo detallado del proceso del AMFE. La incidencia puede ser definida también como un porcentaje. Si un problema no relacionado con la seguridad tiene una incidencia de menos del 1% se le puede dar una cifra de 1; dependiendo del producto y las especificaciones de usuario.

Paso 3: Detección (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Cuando las acciones adecuadas se han determinado, es necesario comprobar su eficiencia y realizar una verificación del diseño. Debe seleccionarse el método de inspección

adecuado. En primer lugar un ingeniero debe observar los controles actuales del sistema que impidan los modos de fallos o bien que lo detecten antes de que alcance al consumidor.

Posteriormente deben identificarse técnicas de testeo, análisis y monitorización que hayan sido utilizadas en sistemas similares para detectar fallos. De estos controles, un ingeniero puede conocer qué posibilidad hay de que ocurran fallos y como detectarlos. Cada combinación de los dos pasos anteriores recibe un número de detección (D). Este número representa la capacidad de los test planificados y las inspecciones de eliminar los defectos y detectar modos de fallos.

Tras estos tres pasos básicos se calculan los números de prioridad del riesgo conocido como (RPN).

Números de prioridad del riesgo

Los números de prioridad del riesgo no son una parte importante de los criterios de selección de un plan de acción contra los modos de fallo. Es más bien un parámetro de ayuda en la evaluación de estas acciones. Después de evaluar la severidad, incidencia y detectabilidad los números de prioridad del riesgo se pueden calcular multiplicando estos tres números: $RPN = S \times O \times D$ Esto debe realizarse para todo el proceso o diseño. Una vez está calculado, es fácil determinar las áreas que deben ser de mayor preocupación. Los modos de fallo que tengan un mayor número de prioridad del riesgo deben ser los que reciban la mayor prioridad para desarrollar acciones correctivas. Esto significa que no son siempre los modos de fallo con los números de severidad más altos los que deben ser solucionados primero. Pueden existir fallos menos graves, pero que ocurran más a menudo y sean menos detectables. Tras asignar estos valores se recomiendan una serie de acciones con un objetivo, se reparten responsabilidades y se definen las fechas de implementación. Estas acciones pueden incluir inspecciones específicas, testeo, pruebas de calidad, rediseño, etc. Tras implementar las acciones en el diseño o proceso, debe comprobarse de nuevo el número de prioridad del riesgo para confirmar las mejoras. Estas pruebas se representan normalmente de forma gráfica para una fácil visualización. Siempre que se realicen cambios en un proceso o diseño, debe actualizarse el AMFE. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Deben tenerse en cuenta algunos puntos obvios pero importantes (Universidad Alberto Hurtado, 2013):

- Intentar eliminar el modo de fallos (algunos fallos son más evitables que otros)
- Reducir la incidencia del modo de fallos
- Mejorar la detección

Nota: No se puede "Minimizar la severidad del fallo" dado que la severidad mide la gravedad del efecto (un hecho). Por ejemplo, si el efecto de un fallo es "posible muerte de un usuario", la severidad es "10" - se minimice o no la frecuencia del fallo. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Esta herramienta es utilizada para cuantificar impactos, priorizar las causas de defectos o de variación de un proceso y tiene la ventaja que con ella se definen medidas de mitigación para reducir el riesgo de ocurrencia. Suele utilizarse en conjunto con otras herramientas que

entregan las causas o modos de fallos a analizar, tales como espinas de pescado o matriz causa-efecto. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Así también el resultado final del número de prioridad de riesgo de cada modo de fallo puede representarse posteriormente en un Diagrama de Pareto para priorizar las principales causas y medidas de mitigación que se deben implementar. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

System		Potential Failure Mode and Effects Analysis (Design FMEA)										Revision B				
Subsystem												Prepared By Robert Crow				
Part Number												FMEA Date 8/18/92				
Design Lead												Revision Date				
Item / Function	Potential Failure Mode(s)	Potential Effect(s) of Failure	S e v	Potential Cause(s)/ Mechanism(s) of Failure	P f e c t	Current Design Controls	B e t	R P H	Recommended Action(s)	Responsibility & Target Completion Date	Action Results					
											Actions Taken	How/When	How/When	How/When	How/When	
Circuit Block 4.1.1	Output loss from pre-amp	Receiver & output data loss; track loss; GPS shut-down	5	C1 short	1	PR-20 & HW-5	2	10	QA Proc 20-6	R. Jones, 11/30/92	Added to control plan	2	1	1	2	
				5	C8 short	2		2	20	QA Proc 20-6	R. Jones, 11/30/92	Added to control plan	2	1	1	2
				5	L1 open/short	3		2	30	QA Proc 20-3	R. Jones, 11/30/92	Added to control plan	2	2	1	4
				5	U21 function	4		2	40	Test 147	R. Jones, 11/30/92	Added to control plan	2	3	1	6
Circuit Block 4.1.2	Undetected & insignificant component failure mode	No noticeable system effect	1	C1 open/crg val	2	None	6	16	None						6	
				1	C8 open/chg val	2		6	16	None					6	
				1		0									6	
Circuit Block 4.2.1	Loss of signal from 2nd RF amplifier & 1st down converter	Loss of position, velocity & time output data, track loss; GPS shut-down	4	C2 short	1	PR-20 & HW-5	2	8	QA Proc 20-6	D. Howell 10/15/92	Added to control plan				6	
				4	C3 short	1	PR-20 & HW-5	2	8	QA Proc 20-6	D. Howell 10/15/92	Added to control plan	2	1	1	2
				4	C4 open/short	2	PR-20 & HW-5	2	16	QA Proc 20-6	B. Howell 10/15/92	Added to control plan	2	1	1	2
				4	C5 short	2	PR-20 & HW-5	2	16	QA Proc 20-6	B. Howell 10/15/92	Added to control plan	2	1	1	2
				4	C6 open/short	2	PR-20 & HW-5	2	16	QA Proc 20-6	D. Howell 10/15/92	Added to control plan	2	1	1	2
				4	C9 short	3	PR-20 & HW-5	2	24	QA Proc 20-6	B. Howell 10/15/92	Added to control plan	2	2	1	4
				4	FL1 short/open	5	None	2	40	100% Insp.	B. Howell 10/15/92	Added to control plan	2	2	2	8
				4	FL2 short/open	5	None	2	40	100% Insp.	B. Howell 10/15/92	Added to control plan	2	2	2	8
				4	R2 open/chg val	2		2	16	None						
4	R18 open/chg val	2		2	16	None							6			

Figura N° 6. Ejemplo aplicado de FMEA. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

3.7 Matriz de causa y efecto (MDF).

Es una herramienta aplicada a procesos que se utiliza preferentemente para identificar, explorar, cuantificar y desplegar gráficamente y en detalle todas las posibles causas de un problema. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Esta herramienta es principalmente usada por el equipo de mejora de un determinado proceso, ya que son ellos los que pueden juntar información para determinar las causas y cuantificar la correlación entre las entradas y salidas de un determinado proceso, a través de técnicas de “brainstorming” u otro. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Pasos de una Matriz Causa Efecto. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Esta herramienta es de confección bastante intuitiva y flexible que tiene por pasos de construcción los siguientes pasos:

- **Identificar** los requerimientos clave del cliente (salidas) desde un mapa del Proceso
- **Hacer un ranking de los CTQ's** para asignar factor de prioridad a cada salida (Usualmente en una escala de 1 a 10).
- **Identificar** todos los pasos del proceso y materiales (entradas) desde el mapa del proceso.
- **Evaluar la correlación** de cada entrada a cada salida.
- **Puntuación baja:** los cambios en la variable de entrada tienen un pequeño efecto sobre la variable de salida.
- **Alta puntuación:** los cambios en la variable de entrada pueden afectar enormemente la variable de salida.
- **Multiplicar en cruz** los valores de correlación con los factores de prioridad y agregarlos en cada entrada.

A continuación mostramos los pasos en las siguientes imágenes

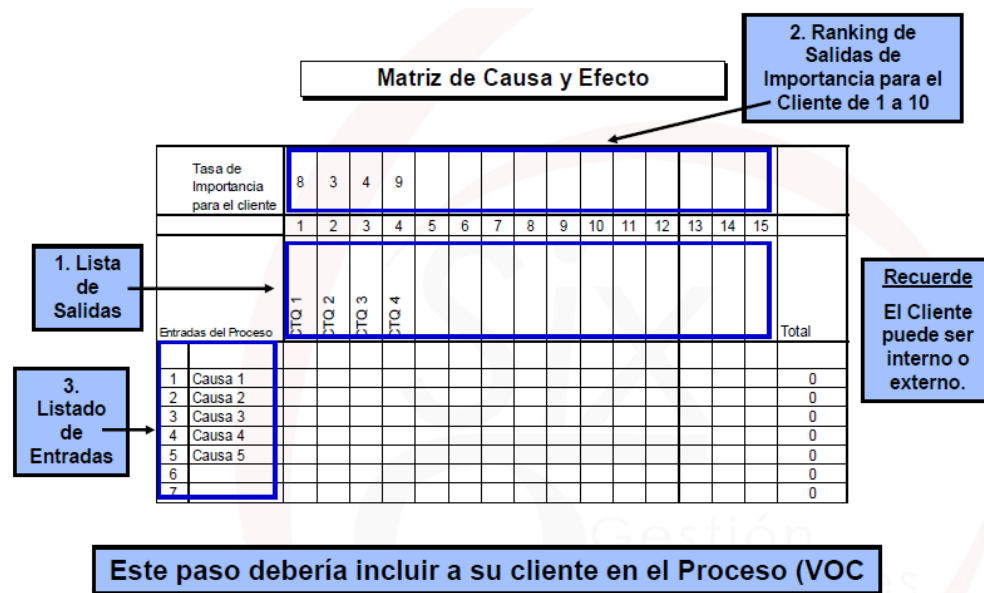


Figura N° 7. Pasos N° 1, 2 y 3 de construcción de una matriz MDF.

Matriz de Causa y Efecto

4. Hace una Correlación de Entradas a Salidas y asigna valor de 1 a 10

5. Multiplique el valor de la correlación por la tasa de importancia y sume horizontalmente

		Tasa de importancia para el cliente															
		8	3	4	9												
Entradas del Proceso		CTO.1	CTO.2	CTO.3	CTO.4												Total
1	Causa 1	5	3	3	2												79
2	Causa 2	2	6	3	2												64
3	Causa 3	5	2	4	9												143
4	Causa 4	9	9	9	10												225
5	Causa 5	1	2	6	1												47
6																	0
7																	0

Este es un estimado subjetivo de cuan influenciabiles son las Entradas en los CTQs (Salidas)

Ahora estamos empezando a sentir las variables mas importantes que explican la variación en los CTQ's

Figura N° 8. Pasos N° 4 y 5 de construcción de una Matriz Causa y Efecto.

Esta herramienta es útil para priorizar las variables del proceso (Xs) o variables de entrada respecto a su influencia en las diferentes características críticas para la calidad de un proceso, suele utilizarse con otras herramientas tal como el SIPOC el cual entrega las distintas variables del procesos en las etapas las cuales con la matriz causa y efecto son valoradas respecto a su influencia en las características críticas para la calidad, por ejemplo en el proceso de almacenamiento y consumo del combustible en una central térmica las distintas variables del proceso previamente identificadas en el SIPOC pueden valorarse respecto a su influencia en la eficiencia del pro proceso de combustión, es decir sobre el indicador consumo especifico del combustible y su influencia sobre el costo final del combustible.

El resultado de la matriz puede ser utilizado en un Diagrama de Pareto para seleccionar variables críticas que luego son sometidas a mediciones más exhaustivas como capacidad de proceso y pruebas de hipótesis

3.8 SIPOC

La sigla SIPOC significa (Universidad Alberto Hurtado, 2013):

Supplier (proveedor): El que proporciona las entradas al proceso; puede ser una persona u otro proceso.

Input (entrada): Material, información, datos, documentación, servicio que se necesita para realizar las actividades del proceso.

Process (proceso): Una secuencia de actividades que añaden valor a las entradas para producir las salidas.

Output (salida): Producto, servicio, información, documentación que es importante para el cliente.

Customer (cliente): El usuario de la salida del proceso



Figura N° 9. Diagrama SIPOC.

El diagrama SIPOC es particularmente útil a la hora de identificar (Universidad Alberto Hurtado, 2013):

- Cuáles son las variables de entrada (Independientes Xs) necesarias para que se ejecute el proceso
- Quién proporciona las variables de entrada para el proceso
- Quién es el verdadero cliente del proceso
- Qué necesita el cliente del proceso (Variables de salida o dependientes Ys)
- Cuál es el propósito y el alcance del proceso
- Cómo medir el rendimiento del proceso
- Cuáles de las actividades del proceso que aportan valor para el cliente o el negocio (y por lo tanto hay que mantenerlas) y cuáles son inútiles (y por lo tanto hay que tratar de eliminarlas)

SIPOC: paso por paso (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

- El diagrama es creado por el equipo de mejora de un proceso y se realiza en sesiones tipo workshops en un medio que permita que el esquema sea visualizado por todos los participantes (Pizarra o proyector de imagen)
- Se dibuja el mapa del proceso empezando por las actividades a más alto nivel. Se dibuja cada actividad debajo del rol que la ejecuta.

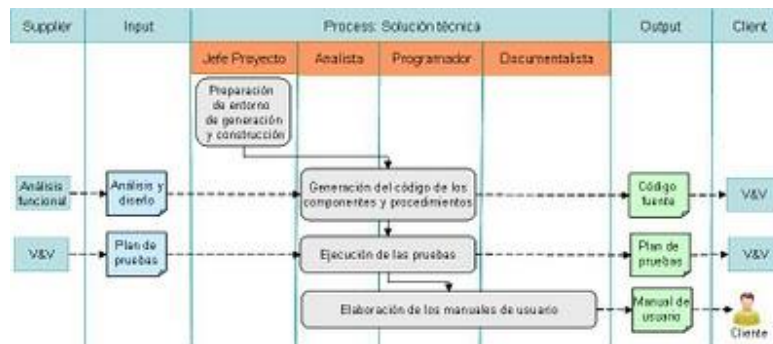


Figura N° 10. Ejemplo de Mapa de Proceso utilizando SIPOC. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

- c) Se identifican las salidas (Outputs) del proceso.
- d) Se identifican los clientes que van a recibir las salidas del proceso.
- e) Se identifican las entradas (Inputs) que se necesitan para realizar el proceso correctamente.
- f) Se identifican a los proveedores (Suppliers) de las entradas necesarias.

En la metodología Six Sigma esta técnica es el punto de partida para identificar la Voz del Cliente (VOC). El diagrama proporciona una visión inicial de los factores vitales (los Xs) para el proceso [$Y = f(X)$] que tienen un impacto significativo sobre el resultado (Y). (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

3.9 Mapa Flujo de Valor (VSM)

El Mapa del flujo de valor es una herramienta utilizada en “Lean manufacturing” para analizar y mejorar los flujos de materiales e información que se requieren para poner a disposición del cliente un producto o servicio. Esta herramienta se desarrolló en Toyota donde se conocía con el nombre de Mapa del flujo de materiales e información. (Cuatrecasas, 2010, págs. 341-343)

Implementación. (Cuatrecasas, 2010, págs. 341-343)

- a) Identificar el producto o servicio
- b) Dibujar el mapa de flujo de valor tal como está el proceso, mostrando cada una de las etapas, las esperas y las informaciones que se requieren para entregar el producto o servicio. Existen símbolos estandarizados que representan los distintos elementos de la cadena de valor.
- c) Identificar sobre el mapa los desperdicios que se encuentran (aquello que no aporta valor para el cliente). Para ello suelen buscarse los 7 desperdicios según el lean: sobreproducción, tiempo de espera, transportes innecesarios, exceso de procesado, inventario, movimientos innecesarios y defectos.
- d) Dibujar el mapa de estado futuro, es decir, el mapa como queda una vez eliminados los desperdicios.
- e) Implementar un plan de acciones de mejora (eventos kaizen) para llegar al mapa de estado futuro.

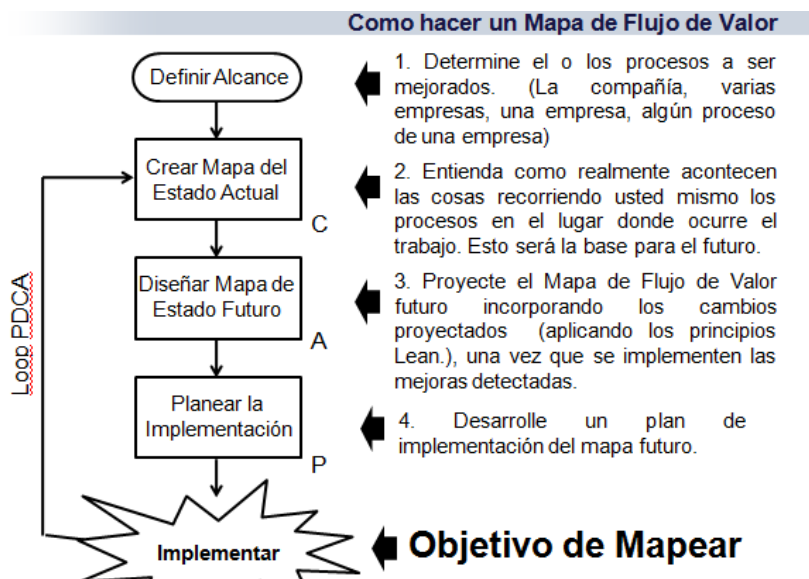


Figura N° 11. Diagrama de un mapa de valor VSM. (Cuatrecasas, 2010, págs. 341-343)

Aplicación (Cuatrecasas, 2010, págs. 341-343)

Aunque el mapa del flujo de valor se asocia tradicionalmente con el sector industrial, ha demostrado su efectividad para mejorar procesos en otros sectores, como el de servicios, logística, hospitalarios, desarrollo de software, etc.

Esta herramienta es muy recomendada cuando se agregan métricas de cada etapa del mapa, tales como tiempo total de ejecución, tiempos de espera, tiempo de interrupción, etc. Lo cual permite clasificar tiempos totales dedicados a actividades que agregan valor y a actividades que no agregan valor, las que deben ser reducidas o eliminadas. A continuación se muestra un VSM aplicado al subproceso de ingreso de carbón a una central termoeléctrica.

VSM (Value Stream Mapping- Mapa de Flujo de Valor) Subproceso Recepción de Carbón de una Central Eléctrica

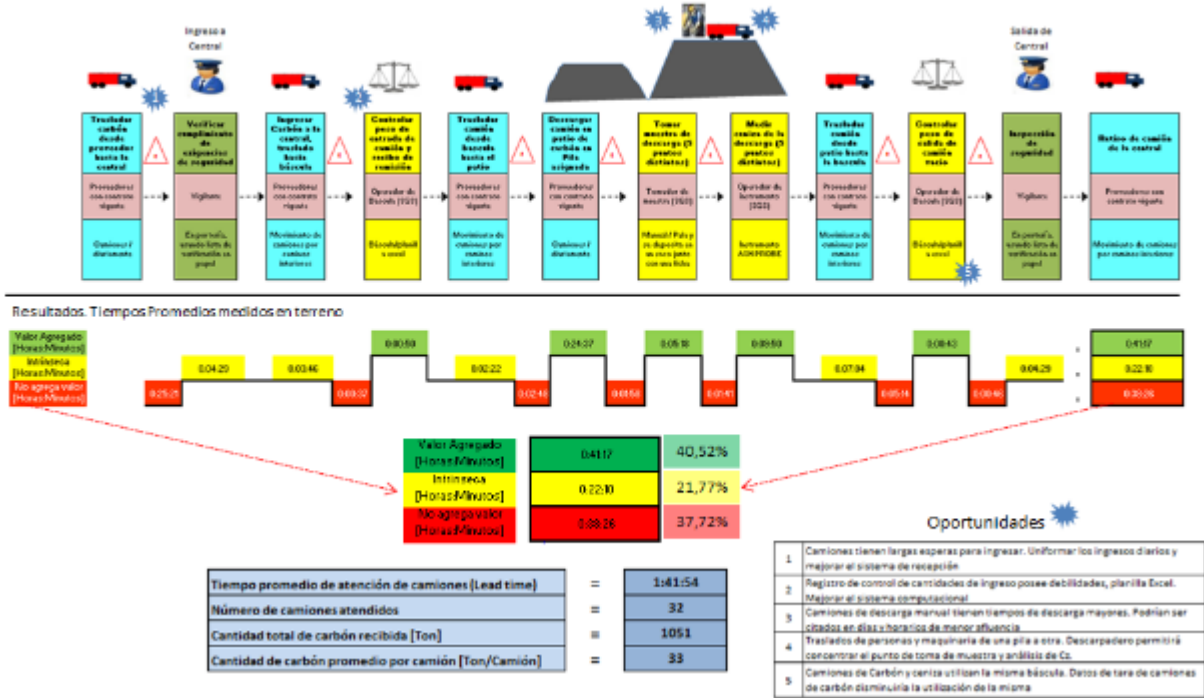


Figura N° 12. Ejemplo aplicado diagrama VSM. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Cuatrecasas, 2010, págs. 341-343)

Tabla N° 4. Simbología utilizada en un VSM

Simbología:

	Flujo electrónico de información
	Flujo de materiales, insumos o productos
	Descripción de flujo de comunicación
	Punto de unión de flujos de trabajo
	Flujo de trabajo
	Proceso o área interna
	Fuentes externas. Clientes o proveedores
	TP Tiempo de procesamiento
	PE Número de personas equivalentes
	Reproceso
	Inventario
	Espera
	Interrupción
	Observación, desviación.

<table border="1"> <tr> <td>Qué?</td> <td rowspan="3">Etapa de proceso</td> </tr> <tr> <td>Quién?</td> </tr> <tr> <td>Cómo?</td> </tr> </table>	Qué?	Etapa de proceso	Quién?	Cómo?	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>Área de Operaciones</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Centro de Control</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Área de Mantenimiento</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Área de Administración</td> </tr> <tr> <td></td> <td>División Combustibles</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Empresa Colaboradora</td> </tr> </table>		Área de Operaciones		Centro de Control		Área de Mantenimiento		Área de Administración		División Combustibles		Empresa Colaboradora
Qué?	Etapa de proceso																
Quién?																	
Cómo?																	
	Área de Operaciones																
	Centro de Control																
	Área de Mantenimiento																
	Área de Administración																
	División Combustibles																
	Empresa Colaboradora																

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Cuatrecasas, 2010, págs. 341-343)

3.10 Capacidad de Procesos

Las variables de salida o respuesta de un proceso deben cumplir con ciertas metas o especificaciones a fin de que sea posible considerar que el proceso funciona de manera satisfactoria. Para lo anterior una tarea primordial del control de calidad es conocer la capacidad o habilidad de un proceso, lo cual consiste en conocer la amplitud de la variación natural del proceso para una característica de calidad dada; esto permitirá saber en qué medida se cumple la especificación de calidad para la variable de respuesta analizada. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Tal como se explica en el Anexo N°6. Conceptos básicos de estadística descriptiva y probabilidad, en la interpretación de los histogramas, las especificaciones de calidad se pueden reflejar como límites de aceptación tanto superior como inferior y de esta manera se podrá calcular si los límites reales del proceso o su variabilidad, se encuentra dentro de estos límites de especificación o si parte de la variabilidad supera uno o ambos límites. Cuando los límites reales del proceso se encuentran dentro de los límites de especificación, entonces un proceso es “capaz”. Para datos variables, existen medidas que nos permiten cuantificar la capacidad del proceso dependiendo de los límites de especificación de calidad. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Nominal mejor.

Cuando existen ambos límites de especificación de calidad, superior (LSE o USL) e inferior (LIE o LSL). Para considerar que hay calidad, las mediciones deben ser iguales a cierto valor nominal o valor objetivo (N), o al menos deben estar con holgura dentro de las especificaciones o límites inferior y superior. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Mayor Mejor.

Cuando solo existe límite superior de especificación de calidad (LSE). (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Caracterización de los datos.

Previo a efectuar mediciones de capacidad de proceso, es necesario realizar un análisis de los datos. Los pasos a seguir son los siguientes. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

- Reconocer el tipo de dato que se tiene. Clasificar si es variable (Continua o discreta) o atributo (Nominales u ordinales).
- Definir el tamaño apropiado para la muestra.
- Organizar los datos en subgrupos racionales o estratificación. En el siguiente apartado se explica en detalle este punto.
- Conocer cómo se distribuyen los datos a través de la determinación de la distribución de probabilidad. Esto debe efectuarse con herramientas que permitan comprobar estadísticamente

que los datos se distribuyen de igual a una distribución de probabilidad conocida, pudiendo utilizar análisis gráficos, P-Value, intervalo de confianza, etc

Capacidad de largo y de corto plazo.

Cuando hablamos de capacidad de un proceso podemos tener una perspectiva de corto o de largo plazo. La **Capacidad de Corto Plazo** se calcula a partir de muchos datos tomados durante un periodo suficientemente corto para que no haya influencias externas sobre el proceso, por ejemplo que no haya importantes cambios de temperatura, turnos, operadores, lotes de materia prima, etc. Por lo tanto, esta capacidad representa el potencial del proceso, es decir, lo mejor que se puede esperar del mismo. Por otra parte está la perspectiva de largo plazo que, a final de cuentas es la que interesa al cliente. De aquí que la capacidad de largo plazo se calcula con muchos datos tomados de un periodo de tiempo lo suficientemente largo como para que los factores externos influyan en el desempeño del proceso. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

En la práctica para diferenciar entre capacidad de corto y de largo plazo se recurre a los subgrupos para cada fuente de variación identificada efectuando posteriormente el cálculo de la desviación estándar de dos maneras. Para el cálculo de capacidad de proceso de corto plazo se utiliza la desviación estándar dentro de los subgrupos, mientras que para la capacidad de proceso de largo plazo se utiliza la desviación estándar de todos los datos asumiendo que la desviación estándar de la muestra S es igual a la desviación estándar de la población σ . (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Subgrupos.

Los subgrupos se refieren a las distintas fuentes de variación propias del proceso, cada una de corto plazo, es decir considerando solo un fuente de variación a la vez sin la afectación de otros factores, por ejemplo si analizamos las fuentes de variación del radio de las perforaciones efectuadas por un taladro y su operador en una placa de metal, suponiendo que con los mismos elementos y condiciones del entorno, las fuentes de variación serían la calidad del taladro (más o menos revoluciones y vibraciones), la calidad de la broca (aleación del metal, marcas, distintos fabricantes), la destreza del operador (operador A v/s operador B) y la dureza de la placa metálica. Si pudiéramos estratificar los datos para cada uno de estos subgrupos, podríamos determinar la variación originada por cada uno y por tanto su desviación estándar que denominamos de corto plazo. Luego la variación total al mezclar todos los subgrupos se denomina de largo plazo. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

3.10.1 Índices de capacidad de corto plazo para procesos.

Índice de Capacidad Potencial del Proceso (C_p).

Se define como la capacidad potencial del proceso de corto plazo y compara el ancho o rango aceptable para la característica de calidad o **Tolerancia Total** con la amplitud de la

variación real o dispersión del proceso que como ya sabemos es igual a seis desviaciones estándar, asumiendo que su distribución es normal, en donde se afirma que entre $\mu \pm 3\sigma$, se encuentra gran porcentaje de la distribución. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Este índice muestra la mejor capacidad que se podría obtener del proceso solo si lo centramos y si la variabilidad es igual a la de corto plazo. Se calcula por medio de la siguiente expresión.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma_{\text{corto plazo}}}$$

Donde $\sigma_{\text{corto plazo}}$ es la desviación estándar de corto plazo del proceso, lo que es igual a decir que es la desviación estándar calculada con el rango promedio de la variación dentro de los subgrupos y una constante que se define según el tamaño de los subgrupos (Cantidad de datos n de la muestra).

Para distribuciones no normales e independiente de la distribución de la característica de calidad, el reporte técnico de ISO 12783 define C_p de la siguiente manera:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{P_{0.99865} - P_{0.00135}}$$

Donde $P_{0.99865}$ es el percentil 99.865 de la distribución de la característica de calidad y $P_{0.00135}$ es el percentil 0.135. De esta manera, cualquiera sea la distribución entre los percentiles, se ubicará el 99.73% de los valores de la característica de calidad y se el índice podrá ser comparado con otros procesos similares. (Cantidad de datos n de la muestra).

Para que el proceso sea considerado potencialmente capaz de cumplir las especificaciones, se requiere que la variación real o natural siempre sea menor que la variación tolerada. De aquí a que lo deseable es que el valor índice sea siempre mayor que 1, si el valor es menor que 1 es una evidencia que el proceso no cumple con las especificaciones. (Cantidad de datos n de la muestra).

La característica “potencial” de este índice y no “real”, se debe a que la medición no toma en cuenta que tan centrado se encuentra el proceso, es decir donde se ubica la media respecto al valor objetivo o nominal del proceso, por tanto asume que centrado el proceso este sería su capacidad real. De lo anterior si la media del proceso está centrada entre ambos límites de calidad, entonces C_p será la capacidad de proceso real. (Cantidad de datos n de la muestra).

Índices de Capacidad de Proceso C_{pi} , C_{ps} y C_{pk} .

Como ya se mencionó, la desventaja del índice C_p es que o toma en cuenta el centrado del proceso. Una forma de corregir esto consiste en evaluar por separado el cumplimiento de la especificación inferior y superior de calidad, a través del **Índice de Capacidad para la**

Especificación Inferior C_{pi} , y el Índice de Capacidad para la Especificación Superior C_{ps} , los cuales se calculan de la siguiente manera. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

$$C_{pi} = \frac{\mu - LIE}{3\sigma_{Corto Plazo}}$$

$$C_{ps} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma_{Corto Plazo}}$$

Estos índices si toman en cuenta la media del proceso μ , al calcular la distancia de esta última a una de las especificaciones. Esta distancia representa la variación tolerada para el proceso de un solo lado de la distribución respecto a la media, hacia la derecha o hasta el límite de especificación superior y hacia la izquierda o hasta el límite de especificación inferior. Por esto sólo se divide entre 3σ , porque solo se está tomando en cuenta la mitad de la variación natural del proceso. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Por su parte el índice C_{pk} , que se conoce como el **Índice de Capacidad Real del Proceso**, es considerado una versión corregida del C_p ya que si toma en cuenta el centrado del proceso. La forma de calcular es la siguiente: (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

$$C_{pk} = \text{Mínimo} [C_{pi}, C_{ps}]$$

El C_{pk} es igual al valor más pequeño entre C_{pi} y C_{ps} , es decir, es igual al índice unilateral más pequeño, por lo que si el índice C_{pk} es satisfactorio (mayor que 1,25), indica que el proceso es realidad es capaz. Si $C_{pk} < 1$, entonces el proceso no cumple con por lo menos una de las especificaciones. Algunos elementos adicionales para la interpretación del índice C_{pk} son los siguientes: (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

- El índice C_{pk} siempre va a ser menor o igual al índice C_p . Cuando son muy próximos, eso indica que la media del proceso está muy cerca del punto medio de las especificaciones, por lo que la capacidad potencial y real son similares.
- Si el índice C_{pk} es mucho menor que el índice C_p , significa que la media del proceso está alejada del centro de las especificaciones. De esa manera, el índice C_{pk} estará indicando la capacidad real del proceso, y si se corrige el problema de descentrado se alcanzará la capacidad potencial indicada por el índice C_p .
- Cuando el valor de C_{pk} sea mayor a 1,25 en un proceso ya existente, se considerará que se tiene un proceso con capacidad satisfactoria. Mientras que para procesos nuevos se pide que $C_{pk} > 1.45$.
- Es posible tener valores del índice C_{pk} iguales a cero o negativos, e indican que la media del proceso está fuera de las especificaciones.

Índices de Capacidad de Proceso C_{pm} (Índice de Taguchi).

Los índices C_p y C_{pk} están pensados a partir de lo importante que es reducir la variabilidad de un proceso para cumplir con las especificaciones. Sin embargo, desde el punto de vista de G. Taguchi, cumplir con especificaciones no es sinónimo de buena calidad y la reducción de variabilidad debe darse en torno al valor objetivo, N , y no sólo para cumplir con especificaciones. En consecuencia, Taguchi (1986) propone que la capacidad del proceso se mida con el índice C_{pm} que está definido por: (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\tau}$$

Donde τ (tau) está dada por:

$$\tau = \sqrt{\sigma^2 + (\mu - N)^2}$$

Donde N es el valor objetivo o nominal de la característica de calidad. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Nótese que el índice C_{pm} compara el ancho de las especificaciones con 6τ , pero τ no sólo toma en cuenta la variabilidad del proceso, a través de σ^2 , sino que también toma en cuenta su centrado a través de $(\mu - N)^2$. De esta forma, si el proceso está centrado, es decir, si $\mu = N$, entonces C_p , C_{pk} y C_{pm} son iguales.

Cuando el índice C_{pm} es menor que 1 significa que el proceso no cumple con especificaciones, ya sea por problemas de centrado o por exceso de variabilidad. Por el contrario cuando el índice C_{pm} es mayor que 1, eso quiere decir que el proceso cumple con las especificaciones, y en particular que la media del proceso está dentro de la tercera parte central de la banda de las especificaciones. Si C_{pm} es mayor que 1,33, entonces el proceso cumple con las especificaciones, pero además la media del proceso está dentro de la quinta parte central del rango de especificaciones. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

3.10.2 Índices de capacidad de largo plazo para procesos.

Estos índices están enfocados al desempeño del proceso a largo plazo, y no sólo a su capacidad. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Índice de Desempeño Potencial del Proceso (P_p)

$$P_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma_{largo\ plazo}}$$

Nótese que P_p se calcula igual al C_p , la única diferencia es que P_p utiliza la desviación estándar de largo plazo, mientras que C_p utiliza la desviación estándar de corto plazo. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Índice de Desempeño Real del Proceso (P_{pk})

Al igual que el C_p el P_p no toma en cuenta el centrado del proceso, por lo que suele complementarse con el índice P_{pk} , el cual se calcula de manera similar al C_{pk} , pero utilizando la desviación estándar de largo plazo. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

$$P_{pi} = \frac{\mu - LIE}{3\sigma_{Largo Plazo}}$$

$$P_{ps} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma_{Largo Plazo}}$$

$$P_{pk} = \text{Mínimo} [P_{pi}, P_{ps}]$$

3.10.3 Restricciones y particularidades para el cálculo de índices de capacidad de proceso

Si se observan las fórmulas para obtener cada uno de los índices de capacidad, podremos deducir que si para procesos con solo un límite de especificación, ya sea Mayor Mejora (Solo LES) o Menor Mejor (Solo LEI), entonces solo podemos obtener el índices de capacidad real de corto plazo C_{pk} y el índice de desempeño real de largo plazo P_{pk} . Por otro cuando se utiliza el software estadísticos Minitab para obtener las capacidades de procesos, cuando la distribución de la característica de calidad del proceso no tiene una distribución de probabilidad normal, el software utiliza herramientas de cálculos no paramétricos y no entregará resultados para índices de corto plazo, por lo que solo será posible obtener los índices de capacidad P_p (En caso de un proceso Nominal mejor) y P_{pk} . (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

3.10.4 Consideraciones previas al cálculo de índices de capacidad de procesos.

Es importante saber que existen consideraciones importantes que se deben verificar previo al cálculo de índices de capacidad de proceso, con el propósito de que los resultados no conduzcan a interpretaciones erróneas. Las consideraciones más importantes se describen a continuación. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

- Los procesos a estudiar deben ser estables, es decir que la variación en el tiempo se deba a las fuentes naturales o normales de variación y no a causas especiales de variación.
- Las características de calidad se deben distribuir de manera normal o por lo menos de una manera no tan diferente de ésta.
- Los cálculos de índices deben estar basados en los parámetros poblacionales del proceso μ y σ . Por lo que si los datos están basados en una muestra pequeña, la interpretación estará sesgada.
- Se deben conocer y establecer correctamente los límites de especificación de calidad, si es que estos no están difundidos y definidos para el proceso en estudio. Lo importante es que estos son definidos por los clientes, lo que algunas veces incluso está regulado por normas del país, criterios estratégicos de la organización o por contratos establecidos con terceros.

3.10.5 Métricas Seis Sigma.

Tal como se explicó en el punto 3.4, La meta de la metodología 6 Sigma es llegar a un máximo de 3,4 defectos por millón de eventos u oportunidades (DPMO) para el desempeño de un proceso. En este punto explicaremos de donde nace la métrica de “Sigmas”. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Calidad de Seis Sigmas o los procesos Seis Sigma se refieren a un concepto que plantea una aspiración o meta común en calidad para todos los procesos de una organización. El término se acuñó en el decenio de 1980-1989, y le dio su nombre al programa de mejora Seis Sigma. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Con los conceptos que ya se han explicado será fácil entender el nivel de calidad en términos de número de Sigmas. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Lo primero que explicaremos es el **índice Z**, el cual le obtiene calculando la distancia entre la media y las especificaciones de calidad, y esta distancia se divide entre la desviación estándar. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

De esta manera, para un proceso con doble especificación se tiene Z superior, Z_s y Z inferior Z_i , que se definen como.

$$Z_s = \frac{ES - \mu}{\sigma} \quad \text{y} \quad Z_i = \frac{\mu - EI}{\sigma}$$

Donde *ES* corresponde a la especificación superior, *EI* es la especificación inferior μ es la media del proceso y σ es la desviación estándar del proceso. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

La capacidad de un proceso medida en términos de Z, es igual al valor más pequeño entre Z_s y Z_i . (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Si la desviación estándar utilizada para calcular el índice Z es de corto plazo, entonces el correspondiente Z también será de corto plazo y se denota como Z_C . En cambio, si la desviación estándar es de largo plazo, entonces el correspondiente Z será de largo plazo y se denota con Z_L . La diferencia entre la capacidad de corto y largo plazo se conoce como **Desplazamiento o movimiento** del proceso y se mide a través del Z de la siguiente manera: (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

$$Z_m = Z_C - Z_L$$

La metodología de Seis Sigma plantea que un proceso se puede desplazar a través del tiempo hasta 1.5 Sigmas en promedio hasta cualquier lado de su valor actual. Por lo general, este 1.5 se utiliza de la siguiente manera: cuando es posible calcular Z_m y éste valor es menor que 1.5, se asumirá que el proceso tiene un mejor control que el promedio de los procesos con un control pobre, y si es mayor que 1.5, entonces el control es muy malo. Si no se conoce Z_m , entonces se asume un valor de 1.5. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

De la forma que se obtiene el índice Z , es posible ver que :

$$3C_{pk} = Z_C \text{ y } 3P_{pk} = Z_L$$

Calidad Seis Sigma.

Tener esta calidad significa que la variación de las características de calidad de un proceso es tan pequeña que el índice Z_C es igual a 6, lo cual implica que la distribución de la característica de calidad cabe 2 veces dentro de las especificaciones, lo anterior asumiendo que el proceso se encuentra centrado y que tiene una distribución normal, según lo explicado en el punto Distribución normal., donde el 99.73% de la distribución se explica con 3 desviaciones estándar hacia cada lado de la media, por tanto $C_p = 2$ y $Z_C = 6$. Por otro lado un proceso con calidad 3 sigmas, implica que la distribución de la característica de calidad cabe una vez dentro de las especificaciones, asumiendo que el proceso se encuentra centrado y con una distribución normal, por tanto $C_p = 1$ y $Z_C = 3$. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

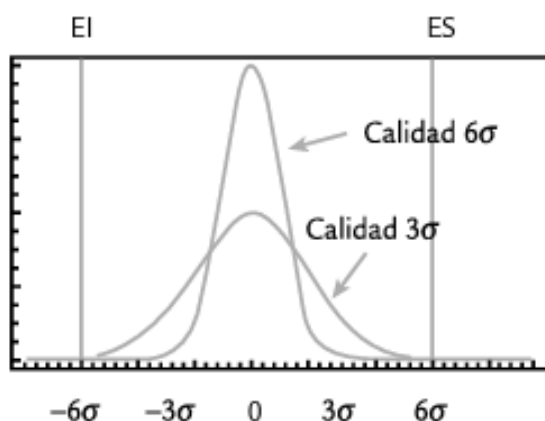


Figura N° 13. Gráfica para procesos de calidad 6 Sigma y 3 Sigma. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

De lo anterior podríamos cuestionarnos porque existe el anhelo de llevar los procesos a un nivel de calidad de 6 Sigma, si con un nivel de calidad de 3 Sigmas, el proceso ya es capaz de cumplir con las especificaciones de calidad. Para esto existen dos argumentos que se describen a continuación. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

- Lo primero que hay que recordar es que para un proceso de calidad de 3 sigmas existe un 0.27% de la distribución fuera de los límites de especificación, esto debido a que asumiendo un proceso estable, centrado y una distribución normal, tenemos que el 99.73% de la distribución se encuentra a 3 desviaciones estándar a cada lado de la media, por tanto el 0.27% restante estará fuera de los rangos de especificación. Si lo anterior lo referimos a probabilidades, es decir al área bajo la curva normal que represente el 0.27% por ciento de la distribución, podemos decir que tendremos que tendremos 27.000 partes defectuosas por cada millón.

Lo anterior puede que para algunos siga siendo algo aceptable, pero esto claramente depende de la característica de calidad y sobre todo del proceso que estemos estudiando, por ejemplo imaginemos lo que ocurre si 27.000 litros de agua potable por cada millón de litros suministrados a la población se contaminaran o lo que ocurriría si tuviéramos 27.000 accidentes aéreos por cada millón de vuelos efectuados o 27.000 cirugías mal realizadas por cada millón. Cualquiera de las dos situaciones anteriores sería tremendamente catastrófico e inaceptable, aunque en la teoría estemos hablando de procesos “Capaces”. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

- Otro aspecto relevante y complementario a lo anterior, es el concepto de largo plazo en la capacidad de proceso. Como dijimos anteriormente un proceso puede a través del tiempo hasta 1.5 Sigmas en promedio hasta cualquier lado de su valor actual, por lo que un proceso de calidad actual de 3 sigmas podría llegar a tener una calidad de 1,5 sigmas a largo plazo, lo cual referido al área bajo la curva de un proceso estable, centrado y que tiene un distribución normal, tendríamos que el área bajo la curva dentro de las

especificaciones es sólo de 93.32%, lo cual implica una tasa de defectos de 66.810 Partes Por Millón (PPM) y $Z_L = 1.5$. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

De lo anterior tenemos que para un proceso de calidad 6 Sigma, a largo plazo podría tener una calidad de 4.5 sigmas, en el peor de los casos, lo cual en términos de área bajo la curva de un proceso estable, centrado y que tiene una distribución normal, le corresponde una tasa de defectos de 3.4 partes por millón, por lo que en la práctica, la calidad Seis Sigma, a pesar de los posibles desplazamientos tiene prácticamente cero defectos y, por lo tanto, representa una meta para los procesos de clase mundial. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

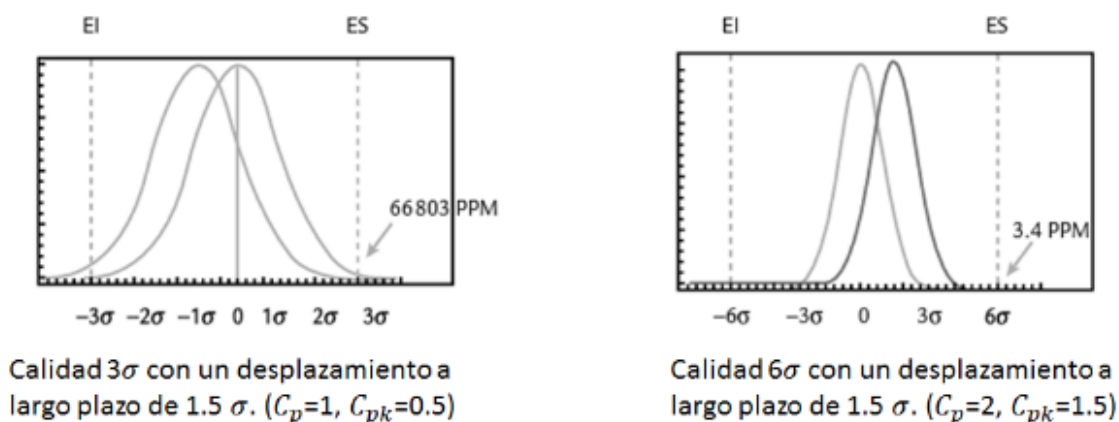


Figura N° 14. Gráfica para calidad 3 Sigma y 6 Sigmas con desplazamiento a largo plazo de 1.5 Sigma. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Finalmente es importante volver a mencionar que en el caso de utilizar el software estadístico Minitab, y que en el caso de que la distribución de la característica de calidad no sea normal, no se podrán obtener niveles de Z de corto plazo y solo será posible obtener nivel sigma de largo plazo Z_L , lo anterior debido a que utiliza herramientas de cálculo no paramétricos. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

3.11 Gráficas de control.

En este punto abordaremos las Gráficas o Cartas de Control que se utilizaran en el desarrollo de la tesis. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Las herramientas vistas hasta el momento para analizar la variabilidad de los datos, no toman en cuenta la secuencia en la que fueron obtenidos. Las Gráficas de Control se especializan en analizar la variabilidad a través del tiempo. Lo anterior es clave para mejorar y controlar las mejoras a los procesos a través de tres actividades básicas (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2):

- Estabilizar los procesos (lograr control estadístico), mediante la identificación y eliminación de causas especiales.

- Mejorar el proceso mismo, reduciendo la variación debida a causas comunes.
- Monitorear el proceso para asegurar que las mejoras se mantienen y para detectar oportunidades adicionales de mejora.

Variación por causas comunes (o por azar).

Es aquella que permanece día a día, y es aportada de forma natural por las condiciones de las llamadas 6M, las cuales son los 6 tipos de causas de variación y que agrupan los diferentes factores. Las 6 M corresponden a: Materiales, Maquinaria, Medición, Mano de Obra, Métodos y Medio Ambiente. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Esa variación es inherente a las actuales características del proceso y es resultado de la acumulación y combinación de diferentes causas que son difíciles de identificar y eliminar, ya que son inherentes al sistema y la contribución individual de cada causa es pequeña; no obstante, a largo plazo representan la mayor oportunidad de mejora. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Variación por causas especiales (o atribuibles).

Es causada por situaciones o circunstancias especiales que no están de manera permanente en el proceso. Por ejemplo, la falla ocasionada por el mal funcionamiento de una pieza de la máquina, el empleo de materiales no habituales o el descuido no frecuente de un operario. Las causas especiales, por su naturaleza relativamente discreta, a menudo pueden ser identificadas y eliminadas si se cuenta con los conocimientos y condiciones para ello. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Proceso en Control Estadístico o Estable.

Estado de un proceso que opera o funciona solo con causas comunes de variación, porque su variación a través del tiempo es predecible. Además, independientemente de que su variabilidad sea mucha o poca, el desempeño del proceso es predecible en el futuro inmediato, en el sentido de su tendencia central y la amplitud de su variación se mantiene sin cambios al menos en el corto plazo. En contraste, se dice que un proceso en el que están presentes causas especiales de variación está fuera de control estadístico o simplemente que es inestable; este tipo de procesos son impredecibles en el futuro inmediato pues en cualquier momento pueden aparecer de nuevo las situaciones que tienen un efecto especial sobre la tendencia central o sobre la variabilidad. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Con el propósito de diferenciar la variación por causas especiales de la variación natural del proceso y de esta manera ayudar a esclarecer las soluciones o mitigaciones para reducir la variabilidad, se utilizan las gráficas de control. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

Grafica IM-R

Como los datos que se obtienen de nuestro estudio son variables, se utilizarán las Gráficas de Control IM-R, correspondientes a dos tipos de gráficas obtenidas de observaciones

individuales sucesivas de una característica de calidad del proceso. Una gráfica es complementaria a la otra en el análisis de variabilidad. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

En una primera gráfica, en el eje vertical se coloca la escala de medida de la variable a analizar y en el eje horizontal se pone la escala de tiempo en que se efectuaron las observaciones. Se posicionan de manera individual las observaciones sucesivas de la variable analizada, tal como se haría en un diagrama de dispersión, señalando en forma de puntos cada observación y uniéndolos con una línea continua secuencialmente. Lo especial de esta gráfica está en dibujar los límites de control estadístico de la variable y la media de las observaciones por medio de líneas continuas paralelas al eje horizontal. El límite superior de control estará dado por el límite superior natural estadístico del proceso igual a $LCS = \bar{x} + 3S$, donde \bar{x} es el promedio o media de las observaciones y S es la desviación estándar de los datos, por otro lado el límite de control inferior es igual al límite inferior natural del proceso igual a $LCI = \bar{x} - 3S$. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

De esta manera los datos que se encuentren dentro de los límites de control se asumen que son parte de la variación por causas comunes, mientras que los puntos que se encuentren por fuera de los límites de control, serán parte de la variación por causas especiales y deberán ser estudiados para encontrar las causas que los originan. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

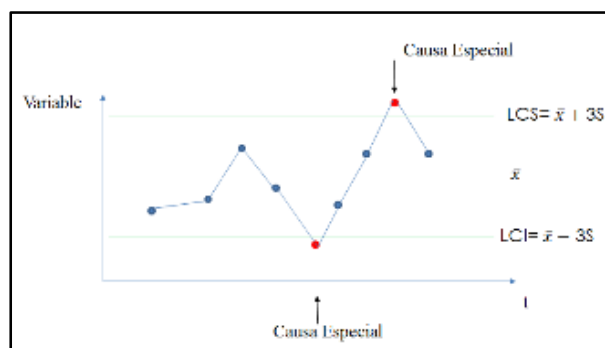


Figura N° 15. Gráfica de control I. (Elaboración propia, 2014)

Para la Gráfica de Control de la Figura N° 15, se tiene un proceso fuera de control estadístico debido a que contiene causas especiales. Las gráficas de control a diferencia de otras herramientas, también pueden mostrar la existencia de tendencias en los datos, las cuales pueden estar dentro de los límites de control pero que también requieren de una verificación para determinar si debemos estratificar en subgrupos o si debemos reevaluar los límites de control que se han definido o analizar si los datos no han sido alterados. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

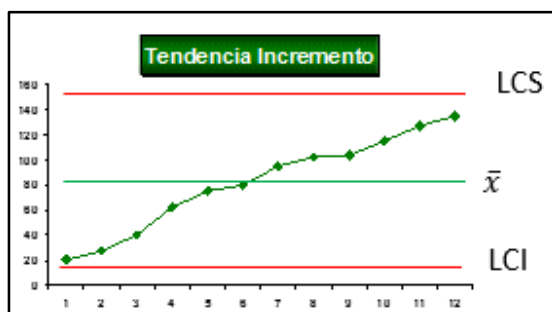


Figura N° 16. Gráfica de Control con datos tendientes al incremento (Elaboración propia, 2014)

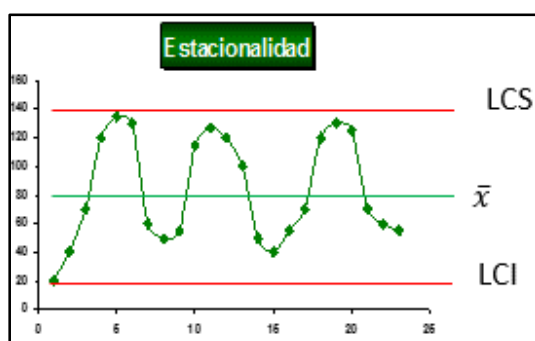


Figura N° 17. Gráfica de control con datos que muestran patrones de temporalidad. (Elaboración propia, 2014)

Para complementar lo anterior se obtiene una segunda gráfica de rangos móviles, en la que cada punto a gráfica se calcula como el rango entre dos observaciones sucesivas de la característica de calidad del proceso y se utiliza para detectar cambios en la dispersión del proceso, ya que si la dispersión aumenta el rango móvil aumentará y si la dispersión disminuye el rango móvil disminuirá. La gráfica tiene los mismos componentes que la anterior pero todos referidos al estadístico Rango Móvil, es decir la media corresponderá al promedio de los rangos móviles y los límites de control se calcula con la media del rango móvil y la desviación estándar del rango móvil. (Humberto Pulido, 2009, p. Capítulo 2)

A modo de ejemplo a continuación se muestra una gráfica I-MR para la Acides de un líquido.

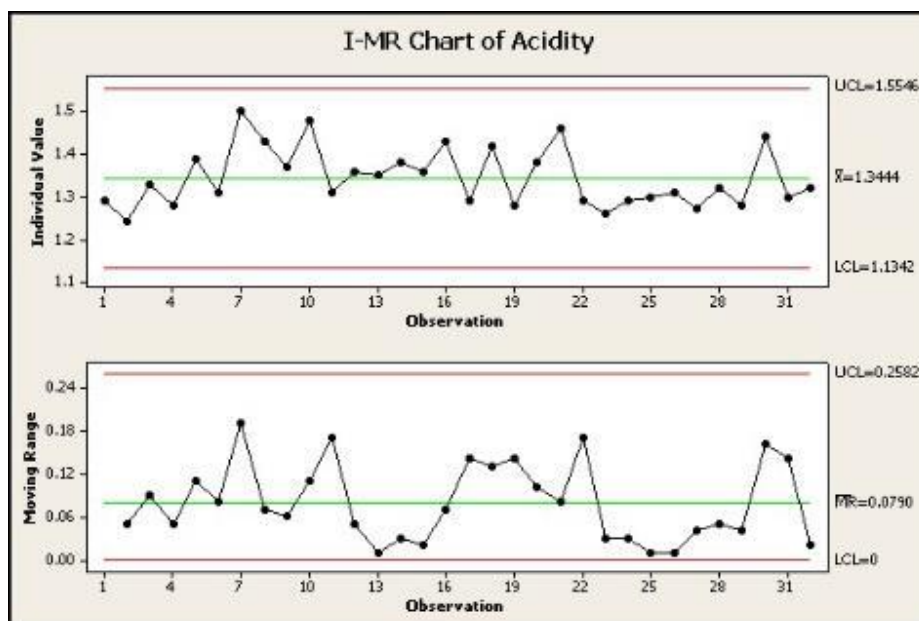


Figura N° 18. Ejemplo Aplicado de Gráfica I-MR. Fuente: (Software MINITAB Versión 16, 2013)

3.12 Estudio de Diseño de Experimentos (DOE)

Un Diseño de Experimento es un set de procedimientos sistemáticos y mediciones que permiten evaluar el efecto de uno o más factores sin la incidencia de variables extrañas o juicios subjetivos. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Usualmente es planteado en término de los efectos de las entradas (X's) sobre la salida (Y) y la meta es conseguir una ecuación que caracterice la salida en función de las entradas y que permita identificar los factores críticos y los mejores niveles para estos factores para un resultado óptimo de la variable de salida, esta ecuación se denominada Ecuación de Transferencia. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Existen diferentes tipos de experimentos, tales como los de Superficie de Respuesta, Factoriales Completos y Factoriales Fraccionados, cuya selección depende del nivel de conocimiento que se tenga del proceso en estudio y por tanto si lo que se busca es caracterizar y optimizar el proceso como es el caso del Superficie de Respuesta y del Factorial Completo o por otro lado si el objetivo es únicamente depurar los principales factores críticos sin un mayor nivel de caracterización para el caso del Factorial Fraccionado.

Otro aspecto importante para la selección del tipo de experimento es la cantidad de factores que se requiera analizar ya que de esto dependerá la cantidad de combinaciones para los distintos niveles de cada factor y por tanto la cantidad de corridas de pruebas que se requerirá realizar, lo cual implicará recursos y muchos casos un análisis de factibilidad de ejecutar el experimento, lo que puede en algunos casos llevar a realizar primero un

experimento Factorial Fraccionario para depurar los principales factores y luego realizar un experimento Factorial Completo. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Debido a que nuestro análisis debe ser completo, con el propósito de comprobar hipótesis y demostrar la real incidencia de los factores críticos en el proceso, utilizaremos Experimentos Factoriales Completos 2^k . Por otro lado complementando lo anterior y como se verá en detalle a continuación, este tipo de experimento utiliza solo dos niveles para cada factor a analizar (Alto y Bajo), por tanto es aplicable cuando existe un efecto o correlación lineal entre los factores (X's) y la salida, lo cual en un principio no es posible de asegurar, pero que si es posible de comprobar al obtener los resultados del experimento, lo cual se logra agregando puntos centrales a los niveles de los factores, lo cual no implica añadir una gran cantidad de pruebas experimentales adicionales, y que es de mucha ayuda ya que permite descartar u comprobar la existencia de curvatura entre ambos niveles (Alto y Bajo).

El Diseño de Experimento consiste en medir el efecto real sobre la variable de salida para cada combinación posible de los distintos factores a analizar, consiguiendo como resultado total, la magnitud del efecto que ejerce cada factor independiente así como la magnitud del efecto de las interacciones entre los distintos factores, obteniendo así una ecuación de transferencia.

Antes del ejecutar el experimento ya habremos seleccionado de una u otra manera los que creemos son los factores críticos que explican el resultado de un proceso o variable de salida, sin embargo desconocemos la real magnitud del efecto de cada factor y sus interacciones. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Al finalizar el análisis del experimento seremos capaces de conocer la ecuación de transferencia y la real magnitud de los efectos particulares de cada factor y de las distintas interacciones. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

$$Y = a \cdot x_1 - b \cdot x_2 + c \cdot x_1 \cdot x_2 + \dots + z \cdot x_n$$

Los principales componentes y definiciones de un experimento son las siguientes. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Tabla N° 5. Construcción de una matriz de un diseño de experimento.

	Poder Calorífico Superior (HHV)	Porcentaje de Ceniza (%Cz)	Índice de Hinchamiento (FSI)
1	6.930	25%	7
2	5.750	25%	7
3	6.930	12%	7
4	5.750	12%	7
5	6.930	25%	2
6	5.750	25%	2
7	6.930	12%	2
8	5.750	12%	2

Factor: Un factor o Entrada es una de las variables controladas o no controladas, cuya influencia en una respuesta o resultado es estudiada en el experimento. Un factor puede ser cuantitativo, por ejemplo Poder Calorífico en Kcal/kWh o puede ser cualitativo, como por ejemplo diferentes operadores (A,B,C, etc).

Niveles: Los niveles son los valores de un factor que se estudian en un experimento. Para factores cualitativos, el valor escogido se convierte en un nivel, por ejemplo Alto (+1) o Bajo (-1), un factor cualitativo también podría tener dos niveles por ejemplo Sucio (-1) o Limpio (+1). para el caso de experimentos factoriales 2^k cada factor solo puede tener hasta dos niveles. En el ejemplo mostrado en la tabla, aunque en la realidad un factor tiene un valor alto o bajo cualitativo, como por ejemplo Índice de Hinchamiento Alto = 7 e Índice de Hinchamiento bajo =2, el modelo matriz del experimento factorial lo interpreta como Alto (+1) y bajo (-1).

Corrida de Prueba o Prueba Experimental: Combinación de niveles individuales de cada factor que produce una o más observaciones de la variable de salida .

Combinación de Tratamiento: Grupo de pruebas experimentales para las distintas combinaciones de los diferentes niveles de cada factor. Para el caso de un experimento factorial completo, el numero de combinaciones de tratamiento es igual al producto de los numero de niveles de cada factor, en el caso del ejemplo es $2 \times 2 \times 2 = 8$

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Tabla N° 6. Matriz de un diseño de experimento con replica

	Poder Calorífico Superior (HHV)	Porcentaje de Ceniza (%Cz)	Índice de Hinchamiento (FSI)
1	6.930	25%	7
2	5.750	25%	7
3	6.930	12%	7
4	5.750	12%	7
5	6.930	25%	2
6	5.750	25%	2
7	6.930	12%	2
8	5.750	12%	2
9	6.930	25%	7
10	5.750	25%	7
11	6.930	12%	7
12	5.750	12%	7
13	6.930	25%	2
14	5.750	25%	2
15	6.930	12%	2
16	5.750	12%	2

Repetición: Realizar más de una prueba experimental consecutivamente utilizando la misma combinación de tratamiento

Replicar: Replicar aleatoriamente todo el experimento

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Las combinaciones de tratamiento pueden ejecutarse de manera aleatoria.

3.12.1 Diseño de Experimentos Factoriales.

Los experimentos factoriales 2^k investigan múltiples factores, en donde cada factor es estudiado únicamente en dos niveles, así un experimento con 3 factores ($k=3$), con 2 niveles cada uno tendrá una cantidad de $2^3 = 8$ combinaciones. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

$$2(\text{niveles})^{k(\text{factores})}$$

La matriz para el diseño de experimentos factoriales usualmente se demuestran en orden estándar. El nivel bajo de un factor es designado con un “-“ o -1 y el nivel alto designado por medio de “+” o +1. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

El Diseño de Experimento puede ser ejecutado con la ayuda de software especializados, en nuestro caso utilizaremos el software especializado en el tratamiento estadístico de datos MINITAB 16. (Software MINITAB Versión 16, 2013)

Los Experimentos Factoriales, se realizan siguiendo los siguientes pasos. (Universidad Alberto Hurtado, 2013), (Software MINITAB Versión 16, 2013)

Paso 1. Definición del Problema.

Ejemplo: Deseamos determinar los efectos que tienen el poder calorífico, el porcentaje de ceniza y el índice de hinchamiento del carbón de consumo de una caldera de una central generadora, en la eficiencia de la central (consumo específico de carbón).

Paso 2. Planteamiento de factores y niveles.

Ejemplo:

Tabla N° 7. Planteamiento de factores y niveles de un diseño de experimento.

Factores	Niveles	
	Bajo (-1)	Alto (+1)
Poder Calorífico Superior (HHV)	5.750	6.930
Porcentaje de Ceniza (%Cz)	12%	25%
Índice de Hinchamiento (FSI)	2	7

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida en (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Paso 3. Crear la matriz del diseño del experimento con la columna de resultados obtenidos para cada combinación de tratamiento.

Tabla N° 8. Matriz de un diseño de experimento con el resultado de la variable analizada.

	Poder Calorífico Superior (HHV)	Porcentaje de Ceniza (%Cz)	Índice de Hinchamiento (FSI)	Consumo Específico
1	6.930	25%	7	3600
2	5.750	25%	7	3500
3	6.930	12%	7	3550
4	5.750	12%	7	3555
5	6.930	25%	2	3590
6	5.750	25%	2	3598
7	6.930	12%	2	3602
8	5.750	12%	2	3601

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida en (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

La creación de una matriz de un diseño de experimento se logra con el software MINITAB 16, con el siguiente direccionamiento.

Estadísticas/DOE/Factorial/Crear diseño factorial. (Software MINITAB Versión 16, 2013)

Ejemplo:

Tabla N° 9. Matriz de un diseño de experimento en Minitab16.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Temp	Pressure	Form Conc	Stir Rate	Filter Rate
1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	71
2	2	2	1	1	-1	1	-1	-1	48
3	3	3	1	1	1	1	1	1	98
4	4	4	1	1	1	1	1	-1	66
5	5	5	1	1	-1	-1	-1	1	43
6	6	6	1	1	1	-1	1	1	104
7	7	7	1	1	1	-1	1	1	88
8	8	8	1	1	-1	1	1	1	10
9	9	9	1	2	1	1	1	1	45
10	10	10	1	2	1	1	-1	-1	66
11	11	11	1	2	1	-1	1	-1	80
12	12	12	1	2	1	1	1	1	90
13	13	13	1	2	1	-1	-1	1	106
14	14	14	1	2	-1	1	-1	1	46
15	15	15	1	2	1	1	1	1	75
16	16	16	1	2	1	1	1	1	96

Fuente: Elaboración propia en base a formato obtenido en (Software MINITAB Versión 16, 2013)

Paso 4. Efectuar el análisis gráfico de los resultados entregados por el software Minitab.

- Gráfica de Pareto de Efectos Principales Estandarizados.
- Gráfica de Efectos Principales.
- Gráfica de Interacción de los Factores

Paso 5. Analizar los resultados de la tabla ANOVA arrojada por el software Minitab para comprobar hipótesis de los efectos significativos de los factores e interacciones.

Paso 6. Obtener la Ecuación de Transferencia para cuantificar los efectos de los factores y sus interacciones, por medio de los resultados arrojados por Minitab en la “tabla de ajuste factorial”, de la cual se extraen los coeficientes de la ecuación para cada uno de los factores y sus interacciones.

Paso 7. Obtener el ajuste óptimo para la proceso, utilizando la “Gráfica de cubos” del software Minitab, para encontrar la mejor combinación de niveles de los distintos factores que entrega el mejor resultado para la variable de salida.

4 Metodología utilizada.

Para el desarrollo de este trabajo de titulación, el cual se expone entre los capítulos 5 al 8, se utilizará la metodología Lean - Seis Sigma, para lo cual se abordarán las principales actividades y herramientas de cada una de las etapas del ciclo de mejora continua de Seis Sigma conocido como DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, por las siglas en inglés), el cual es uno de los modelos de gestión de mejora continua de procesos con mayor reconocimiento mundial y uso en la industria y que fue descrita en el marco teórico.

Respecto a la metodología Lean se recogen sus principios de creación de un flujo ágil en el proceso de sus principales herramienta para la detección y eliminación de los 8 tipos de desperdicios mencionados en el marco teórico.

Con lo anterior, uniendo ambas metodologías se busca por un lado **reducir la variabilidad** de los aspectos críticos para la calidad del proceso con foco en la eliminación o reducción de los “**Defectos**” utilizando la metodología **Seis Sigma**, como por ejemplo medir y mejorar el grado de apego de las calidades del carbón utilizado en la actualidad con las especificaciones de las calderas, y por otro lado se busca reducir o **eliminar todo lo que no aporta valor** al proceso de almacenamiento y combustión del carbón reduciendo los “**Desperdicios**” utilizando la metodología **Lean**, como por ejemplo eliminar pérdidas de eficiencia en la generación producto desperdicios en el proceso de combustión, tal como el vapor sobrecalentado.

Un aspecto importante a señalar en este punto es que con la metodología Seis Sigma se realizará un análisis mayoritariamente matemático y estadístico utilizando los datos extraídos del proceso (análisis abstracto) y por otro lado con la metodología Lean se realizará un análisis de las acciones que acontecen en el lugar de trabajo (Gemba), por tanto la detección de desperdicios y mejoras propuestas resultan de la observación metódica de las actividades en terreno (confección de mapa secuencial de actividades y su clasificación entre actividades que “aportan valor”, intrínsecas y las que “no aportan valor”). De esta manera ambas metodologías se complementan ya que los resultados estadísticos y las causas de defectos o desviaciones encontradas, tienen su explicación en cómo se ejecutan en la práctica las tareas y actividades de cada etapa del proceso.

La decisión de utilizar este método de desarrollo, radica en que la aplicación rigurosa de las herramientas y conceptos de cada etapa del ciclo DMAIC, asegura que las causas de los problemas detectados, en los cuales se centraran los esfuerzos de mejora, sean realmente las que más afectan a la calidad del proceso y la satisfacción del cliente. Lo anterior debido a que el modelo se basa en un método científico para la resolución de los casos de estudio a través del análisis y tratamiento estadístico de los datos obtenidos y a la demostración de la real afectación de los factores que inciden en la o las variables de repuesta del proceso, por medio de análisis matemático. (Conclusiones basadas en hechos)

En el siguiente diagrama se muestran las distintas etapas del DMAIC y las principales actividades que abarca cada una.

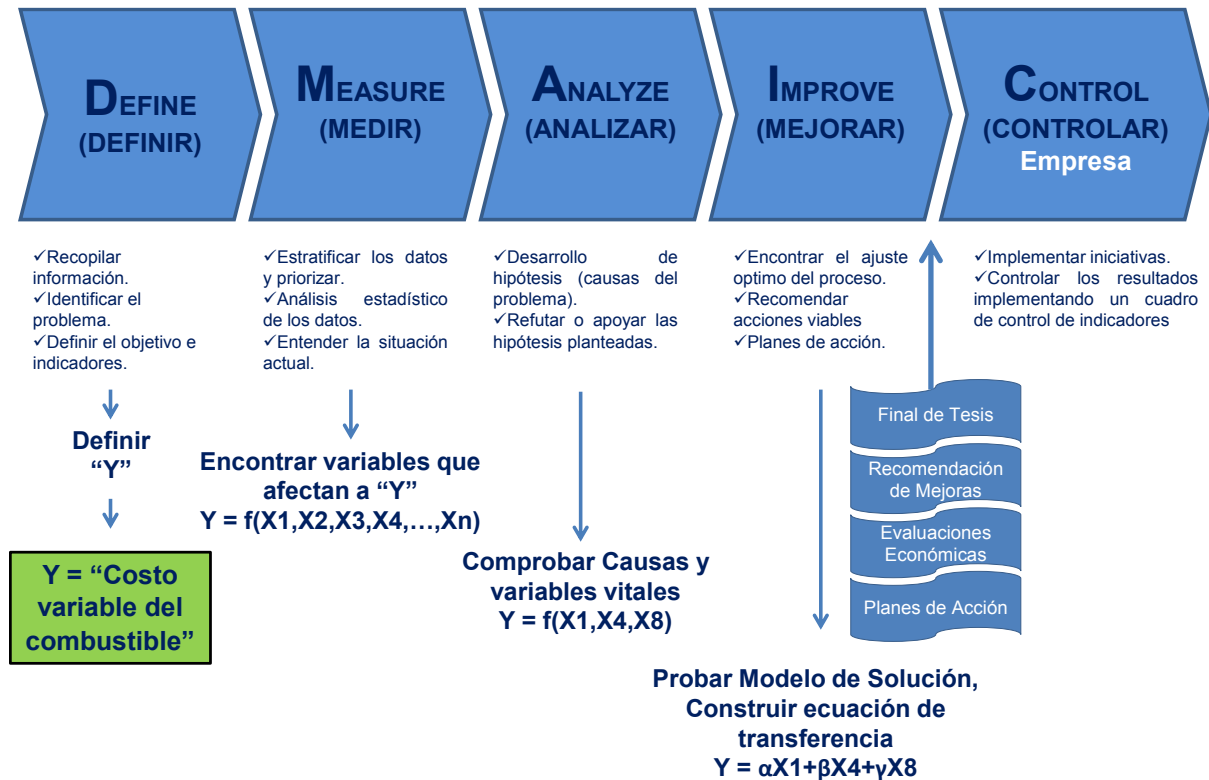


Figura N° 19. Diagrama de descripción de las etapas DMAIC. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Es importante señalar que este trabajo de tesis no considera la ejecución de la última etapa "Controlar", debido a que esta corresponde a la implementación de las mejoras a través de los planes propuestos, sin embargo si se considera entregar recomendaciones para la ejecución de esta última etapa.

Con el propósito de facilitar la comprensión de los distintos capítulos, el orden lógico de este documento y la utilización del DMAIC, a continuación se muestra una tabla con los principales contenidos y herramientas utilizadas en orden secuencial.

Tabla N° 10. Principales contenidos de cada capítulo.

Capítulo	Etapas	Contenidos generales	Herramientas
1	Introducción	Definición de objetivos, alcance y planteamiento del problema	
2	Antecedentes	Descripción de una central termoeléctrica y el mercado de generación de energía.	
3	Marco teórico	Conceptualización de herramientas analíticas y metodología utilizada, en orden secuencial según cada capítulo o etapa del DMAIC: Definir - Medir: OEE, Diagrama de Ishikawa, Diagrama de Pareto. Seis Sigma, Lean Manufacturing. Medir: Matriz a modo de fallo (FMEA o AMFE), Matriz de causa y efecto (MDF), SIPOC, Mapa de flujo de valor, Conceptos y métricas de estadística descriptiva y capacidad de procesos. Gráficas de control. Analizar: Pruebas de Hipótesis. Mejorar: Estudio de diseños de experimentos (DOE).	
4	Metodología	Explicación sobre la selección de la metodología a utilizar	
5	Desarrollo - Definir	Magnitud del problema y Justificación del proyecto. Identificar el proceso a mejorar junto con las iniciativas de mejoras a abordar durante el desarrollo del proyecto. Cuantificación básica de potenciales beneficios económicos a partir del rendimiento actual (Situación base) y el objetivo a alcanzar.	OEE de central térmica v/s centrales hidráulicas Mapa de procesos Histogramas Gráfica de dispersión Gráficas I-MR Diagrama de caja Diagrama de Pareto Regresión lineal y coeficiente R ²
6	Desarrollo - Medir	Entender el rendimiento actual del proceso. Identificar y priorizar las posibles causas de variación o desperdicios detectados. Medición de la capacidad actual del proceso	Mapa de flujo de valor (VSM) SIPOC Matriz Causa-Efecto Diagrama espina de pescado Diagrama de Pareto Diagrama de dispersión Matriz a modo de fallo FMEA Capacidad de Proceso Nivel Sigma
7	Desarrollo - Analizar	Comprobar matemáticamente cuales de las potenciales causas realmente afectan al proceso por medio del planteamiento y resolución de hipótesis. Selección de variables críticas identificadas.	Planteamiento y resolución de hipótesis nula y alterna. Prueba "T de una muestra" Gráfica de línea Gráfica de dispersión Análisis de regresión ANOVA Gráfica de cajas Gráfica de barras
8	Desarrollo - Mejorar	Conseguir mejoras cuantificadas y probar la solución definitiva a implementar. Obtención del ajuste óptimo para el proceso. Propuesta de acciones correctivas o contramedidas a implementar, correspondientes al plan de acción y plan de control para la implementación de las mejoras. (Planificación de la etapa controlar) Evaluación económica, con potenciales beneficios a obtener para la condición del proceso mejorado. La ejecución de la etapa controlar del DMAIC, no es parte de este trabajo ya que corresponde a la implementación de las contramedidas.	Estudio de Diseño de Experimento (DOE) Análisis gráficos de resultados del DOE: Diagrama de Pareto de los efectos, Gráfica normal de efectos, Gráfica de efectos principales, Gráfica de interacción, ANOVA, ecuación de transferencia, gráfica de cubos. Gráfica de línea Gráfica de barras Gráfica de control
9	Resultados y conclusiones	Síntesis de resultados y conclusiones. Logros alcanzados	
10	Bibliografía	Documentos de referencia de la elaboración del trabajo de titulación.	
11-16	Anexos	Mapa del proceso desarrollado, SIPOC desarrollado en el proceso, FMEA desarrollada en el proceso, Plan de acción propuesto, Conceptos básicos de estadística, Principales características y componentes del carbón mineral	

Fuente: Elaboración propia en base a la estructura e información contenida en esta tesis, 2014.

5 Desarrollo del trabajo - Etapa Definir

5.1 Situación actual. Factor de utilización (OEE) de la central ejemplo y centrales hidráulicas del grupo.

Con el propósito de focalizar los esfuerzos de análisis de reducción de costos en el aspecto que mayor potencial de mejora se obtiene de la central, el primer paso será calcular el indicador OEE (Overall Equipment Efficiency), de la central y de otras centrales hidráulicas pertenecientes a la misma empresa en Colombia. El resultado nos ayudara a encontrar las principales causas de desaprovechamiento de la energía que podría ser generada y nos ayudará a contrastarla con el propósito de reducción de costos en la central.

En el caso de una central generadora el indicador OEE corresponde al “factor de carga” el cual refleja el porcentaje de energía que realmente es generada respecto a la energía que teóricamente podría haberse generado en un período de tiempo determinado.

Factor de carga [%] = Energía real generada en un periodo de tiempo [GWh] / Energía teórica que podría haberse generado en el mismo periodo de tiempo [GWh] x 100

El factor de carga puede ser descompuesto en otros dos indicadores, el primero es denominado “Factor de Disponibilidad”, el cual refleja la energía realmente generada, luego de descontar la energía desaprovechada en el período en estudio por causa de indisponibilidad de la central ya sea por fallas o por mantenimientos.

Factor de Disponibilidad [%] = Energía real generada en un periodo de tiempo [GWh], luego de descontar la energía desaprovechada por indisponibilidades en el mismo periodo/ Energía Teórica que podría haberse generado en el mismo periodo de tiempo [GWh] x 100.

El segundo indicador denominado “Factor de Utilización”, refleja la energía realmente generada, luego de desconectar la energía desaprovechada en el período en estudio por causa de no utilización o limitaciones de carga en la generación.

Factor de Utilización [%] = Energía real generada en un periodo de tiempo [GWh], luego de descontar la energía desaprovechada por no utilización o por limitaciones de carga/ Energía real generada luego de descontar las indisponibilidades [GWh] x 100.

Luego el factor de carga se obtiene de la siguiente manera:

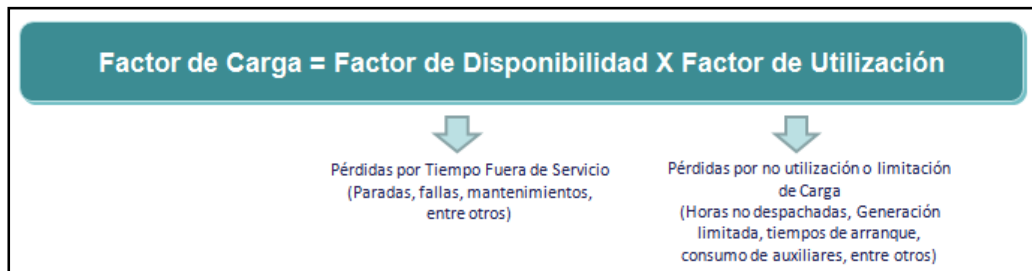


Figura N° 20. Descripción de factor de carga. (Elaboración propia, 2014)

La obtención del indicador puede ser representada gráficamente bajo el siguiente esquema.

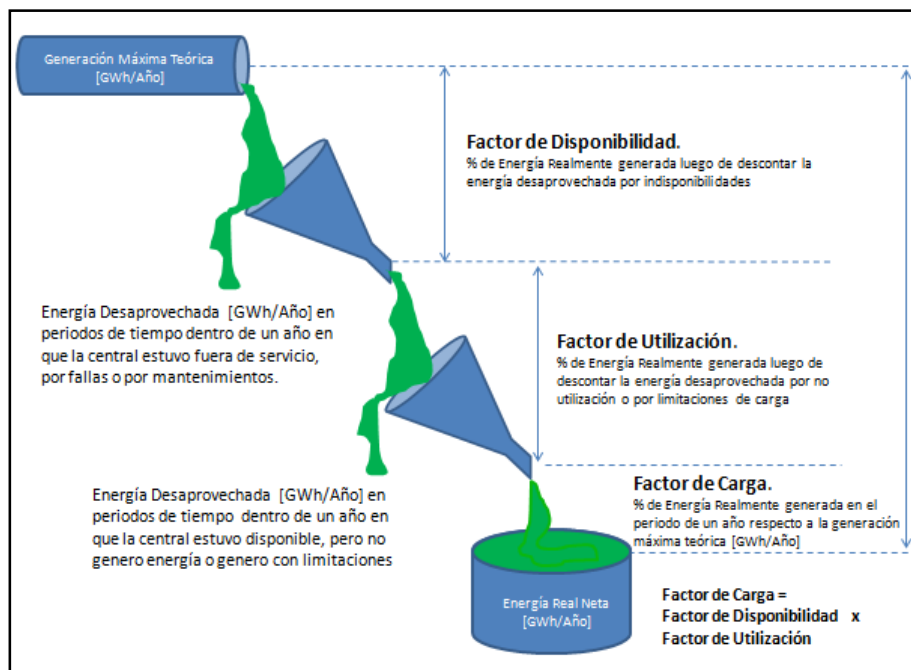


Figura N° 21. Esquema explicativo de factores asociados a generación. (Elaboración propia 2014)

En el esquema anterior, se ilustra como un “desperdicio” la energía que no se genero y que por capacidad nominal de la central, podría haber sido generada, aun cuando esta energía no fue producida, es decir no necesariamente la energía debe haber sido producida para que esta sea “derrochada”. Se ha decidido dar este enfoque de manera consistente con la definición de los 8 desperdicios o mermas de proceso que identifica la Metodología LEAN, debido a que en este caso, si la central se encuentra disponible y no genera energía, es necesario contar y gestionar con un inventario de combustible, así como productos químicos para el tratamiento del agua de recirculación de la caldera, por otro lado es necesario consumir servicios auxiliares para mantener operativos los procesos básicos de la central, se tienen RRHH subutilizados y

se efectúa procesamiento de información para la elaboración de registros e informes rutinarios, entre otros.

A continuación se muestra el resultado obtenido para estos factores de las 4 unidades de generación de la central “Ejemplo” y para el total de las centrales hidráulicas agrupadas, todas pertenecientes al mismo grupo generador en Colombia con el propósito de comparar magnitudes.

Los valores de energía corresponden a promedios anuales para lo cual se utilizó información obtenida de los resultados anuales de generación entre los años 2011, 2012 y 2013.

Tabla N° 11. Comparación de niveles de producción central a carbón vs hidráulica.

Central	Tecnología	Potencia bruta declarada [MW]	Energía máxima teórica Anual Promedio [GWh] (A)	Energía Bruta Teórica Promedio, después de indisponibilidades [GWh] (B)	Energía Neta Promedio, luego de indisponibilidades, no utilización o limitaciones de carga [GWh] (C)	Factor de Disponibilidad (B/A)	Factor de Utilización (C/B)	Factor de Carga
EJEMPLO	Térmica	235,50	2.000,81	1.531,61	508,10	76,5%	33,2%	25,4%
Parque Hidráulico Emgesa	Hidráulica	2.451,20	20.830,31	19.242,98	11.739,46	92,4%	61,0%	56,4%

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

En la tabla anterior, es posible apreciar que el factor de carga en una central térmica, como es el caso de la Central “Ejemplo” está muy por debajo del resultado que obtienen las centrales hidráulicas. El factor de utilización es de 33,2% para la central “Ejemplo”, lo que demuestra un bajo comportamiento en relación a las otras instalaciones, donde podemos reconocer un desaprovechamiento de la energía de la central.

Si descomponemos las causas del desaprovechamiento de energía en las cuatro unidades de generación agrupadas como central “Ejemplo”, podremos explicar el resultado de los factores obtenidos.

A continuación se muestran los gráficos de resultados anuales de generación para la Central “Ejemplo” desde el año 2011 hasta el año 2013, destacando en color naranja la energía desaprovechada y su causa, además en color azul se muestran los resultados reales de energía generada luego de restar las mermas.

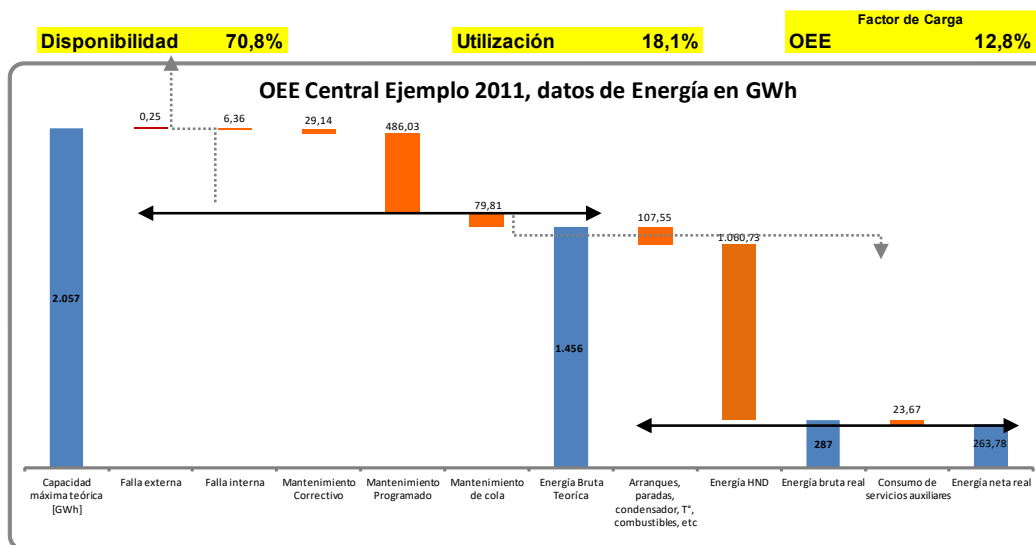


Figura N° 22. Diagrama de consumos de la central “Ejemplo”. Año 2011 (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

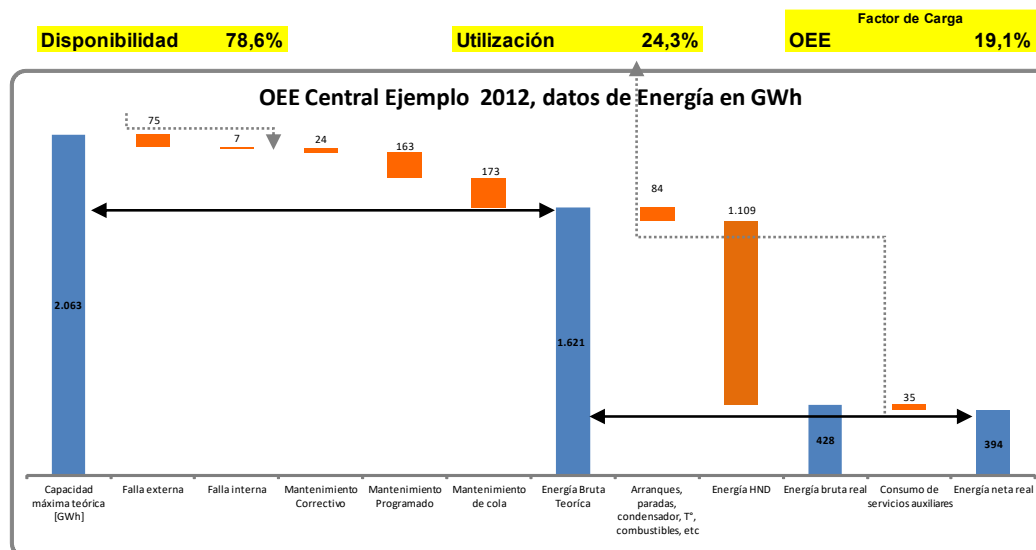


Figura N° 23. Diagrama de consumos de la central “Ejemplo”. Año 2012. (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

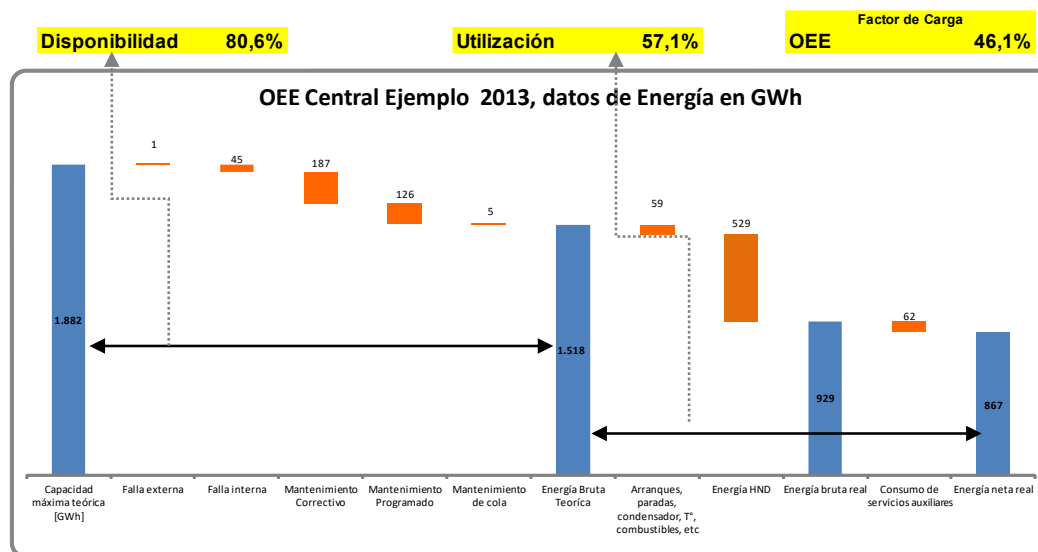


Figura N° 24. Diagrama de consumos de la central "Ejemplo". Año 2013 (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

De los gráficos anteriores podemos visualizar que el principal foco de desaprovechamiento de energía corresponde a la energía no generada debido a que la central o sus distintas unidades de generación no fueron despachadas (Horas No Despachadas = HND), lo cual explica el bajo resultado del factor de utilización.

Las horas no despachadas (HND), dependen directamente del precio ofertado de cada unidad de generación de la bolsa de energía y este último depende del costo de generación de cada unidad, por tanto de esta manera hemos podido mostrar de manera cuantitativa la situación actual de la productividad de la central y su relación con el costo de generación, con lo cual confirmamos que este último aspecto será el foco de análisis de este trabajo de titulación

5.2 Selección del Proceso a Mejorar.

5.2.1 Mapa de procesos de empresa generadora.

Con el fin de poder seleccionar el proceso a intervenir se presenta el mapa de procesos de la empresa generadora en Colombia, el que agrupa los procesos del negocio de generación y del negocio de distribución, así como los procesos estratégicos y de apoyo en base a la estructura actualizada disponible al momento de efectuar el análisis.

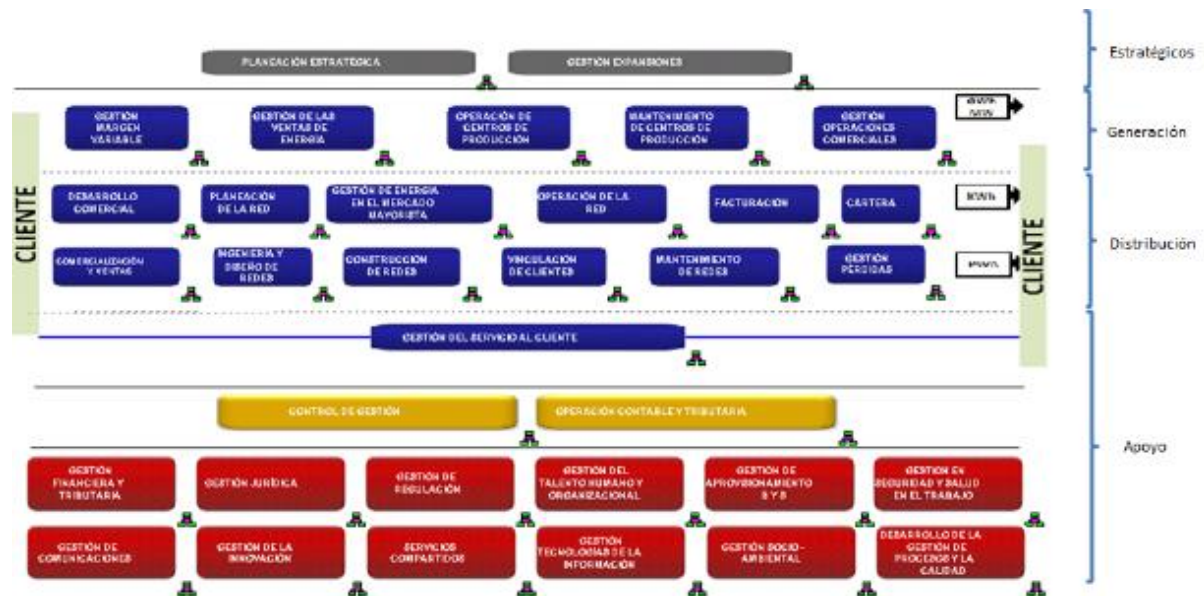


Figura N° 25. Mapa de proceso de la empresa generadora. (Endesa Colombia, 2013)

Los procesos del negocio correspondiente a generación de energía eléctrica abarcan una serie de subprocesos que se detallan a continuación como se indica:

Gestión del margen variable.

- Administración del cargo por confiabilidad
- Planeación energética
- Gestión de bolsa de energía

Gestión de las ventas de energía.

- Ventas de energía
- Compras de energía

Operación de centro de producción

- Gestión hídrica.
- Gestión de combustibles.
- Tratamiento de agua,
- Producción de vapor.
- Gestión de emisiones
- Producción de energía eléctrica

Mantenimiento de centros de producción

- Planeamiento del mantenimiento centros de producción
- Ejecución del mantenimiento centros de producción

Gestión de operaciones comerciales.

- Gestión de fronteras comerciales.

- Gestión de facturación.
- Gestión de cartera.
- Gestión de agentes de mercado.

Ventas.

- Entrega de productos y servicios complementarios

5.2.2 Estructura del costo de generación

Para seleccionar el proceso a intervenir analizaremos la estructura del costo variable de generación (CV) de cada central térmica a carbón en Colombia, cuyos componentes se describen a continuación:

a) Costo Variable de Combustible (CVC) [\$/MWh].

En la actualidad, en la central “Ejemplo”, el costo variable unitario depende del precio de la tonelada de carbón puesta en la pila o en la patio de acopio, lo que incluye el costo del combustible como tal, que es comprado a proveedores de zonas cercanas a la central (en su mayoría productores). El costo variable incorpora los costos para el traslado a la central, los costos de recepción, descarga, mantenimiento de la pila, manipulación de muestras y análisis de laboratorio para el control de calidad y de la eficiencia de la unidades de generación, considerando para esto el factor de consumo de carbón v/s la energía generada de cada una de las unidades de generación.

b) Costo de Operación y Mantenimiento (COM) [\$/MWh].

Corresponde al costo de operación y mantenimiento reconocido por el ente regulador, bajo resolución 034/2001, el cual es actualizado mensualmente según el valor del IPC.

c) Otros Costos Variables (OCV) [\$/MWh].

Corresponde a pagos de impuestos y obligaciones sociales que debe incurrir la empresa para poder operar la central.

Solo como ejemplo, a continuación se muestra el cálculo del costo variable de generación de un mes cualquiera para las distintas unidades de generación de la central “Ejemplo”. En el ejemplo se observa que el costo variable (CV) se calcula como la suma de los costos CSC, COM y OCV.

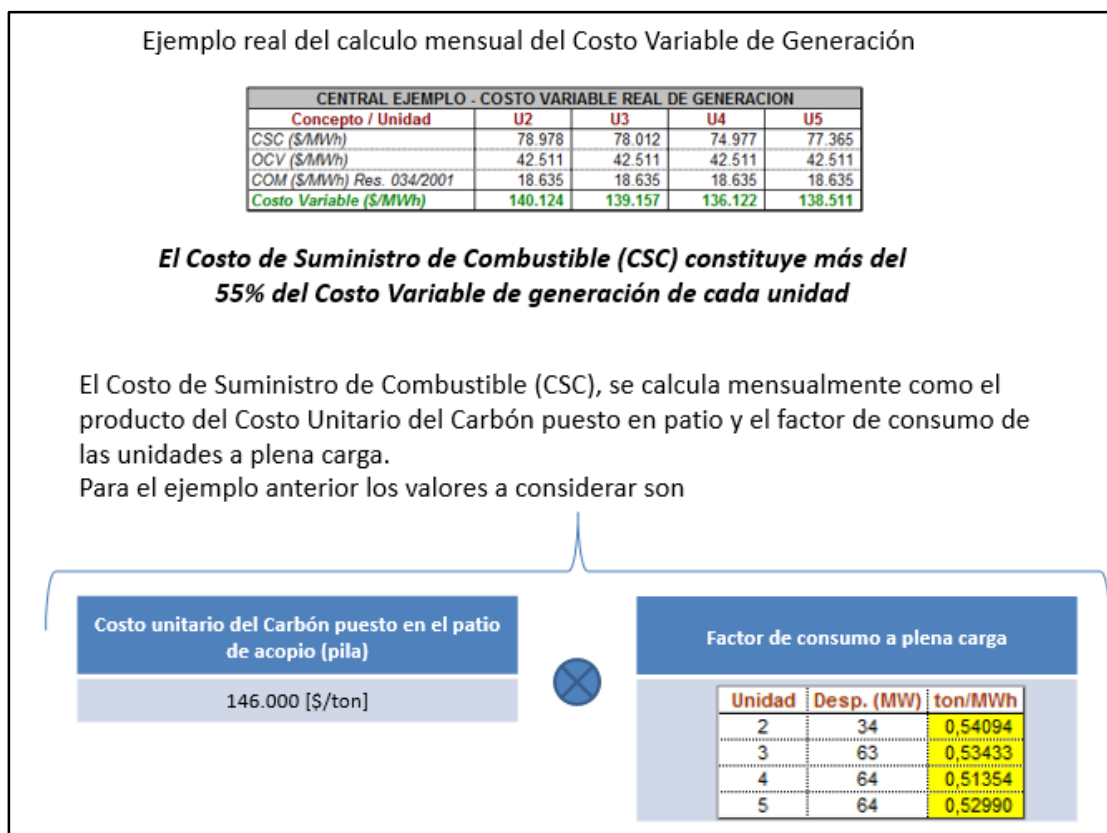


Figura N° 26. Ejemplo explicativo para cálculo del costo variable de generación. (Endesa Colombia, 2013)

Debido a que el costo del combustible es el más significativo dentro de los distintos costos que componen el costo variable de generación, **este trabajo se focalizara en reducir este ultimo y propondrá ésta variable como indicador “Y”**.

5.2.3 Selección del proceso a mejorar.

De acuerdo a lo indicado el punto 5.2.15.2, para lograr reducir el costo variable se propondrán iniciativas de mejora en el **proceso de Operación de Centros de Producción**, específicamente en el **subproceso de Gestión de Combustibles**, el que contempla actividades de Provisión, Recepción, Almacenamiento y Consumo del Carbón, tareas que pueden impactar directamente “Costo Unitario del Carbón Puesto en Patio” y “Factor de Consumo” o eficiencia de cada una de las unidades de generación, variables de las cuales depende el costo variable del combustible.

5.3 Identificación de propuestas de mejora en los subprocesos escogidos.

Para introducirnos en este punto, debemos comprender la definición teórica de costo fijo y costo variable.

Los costos fijos son los que no varían con los cambios de volumen de producción o ventas. Estos se producen exista o no producción, ventas o actividad de un negocio, algunos ejemplos característicos son alquileres, salarios administrativos, etc.

Los costos variables son aquellos que varían en proporción directa con el nivel de ventas, producción o actividad que realiza un negocio, algunos ejemplos característicos son las materias primas, compras de mercaderías o insumos. Son éstos últimos los que son parte de nuestro análisis, por lo que describiremos a través de la siguiente definición para el costo variable:

$$CV = CVU \times Q$$

Donde:

CV = Costo variable

CVU = Costo variable unitario de la materia prima, como por ejemplo costo de una tonelada del combustible Carbón.

Q = Cantidad total de materia prima utilizada, como por ejemplo cantidad de carbón consumido, la cual estará en proporción directa con los niveles de generación de la central.

Es parte de nuestro análisis esté enfocado en disminuir el **Costo Variable Unitario (CVU)**, es por ellos se efectuar mejoras del proceso y/o subprocesos para disminuir el costo unitario por tonelada de carbón que esté puesta en el patio de abastecimiento, esto implica la aplicación de algunas herramientas estadísticas sobre las variable principales que impacten al proceso, además de analizar su relación y efecto que puedan tener sobre otras iniciativas que afecten a la eficiencia entre el consumo de carbón y la generación de energía eléctrica (Factor de consumo).

Los beneficios de implementar estas propuestas pueden ser el mayor margen variable del producto, ya sea por cualquiera de los escenarios que se escojan según lo indicado en la Figura N° 2.

Para la definición de **Cantidad de Carbón Consumido (Q)** de nuestro caso en estudio, focalizaremos nuestro análisis en las cantidades de carbón que son consumidas por cada unidades de la central para generar energía eléctrica que es solicitada por el SIN, para ello se ha efectuado un análisis del comportamiento del “Factor de Consumo” de cada unidad de la central por separado. En éste análisis se identifican donde se encuentran las mayores pérdidas de eficiencia considerando las características de diseño de las máquinas en comparación con las características del carbón que es consumido. Es parte del análisis identificar y evaluar las variables críticas aplicando herramientas analíticas de la metodología para verificar espacios de mejora del proceso en análisis.

Como parte de los resultados del análisis se espera identificar los beneficios de las propuestas producto de la reducción de las pérdidas y por consiguiente haya un aumento de la potencia disponibles de las unidades conllevando mayor disponibilidad de energía al sistema

eléctrico y con ello propiciar un aumento en las ventas de energía, obviamente a un menor costo, es decir producir más con menos.

Respecto a este último punto, es importante señalar que el enfoque puede ser ampliado, analizando lo que ocurre con las cantidades adquiridas de carbón, es decir que las compras de las toneladas totales puestas en patio, pueden no necesariamente estar relacionada con las cantidades efectivamente consumidas, aunque lo correcto es que así lo fuese.

Esta situación se conoce como flujo PULL establecida por la metodología LEAN, esto quiere decir que el flujo de carbón en el ingreso sea el requerido efectivamente por la central en cuanto a la cantidad necesaria para el consumo junto con la calidad adecuada de acuerdo a las características de diseño de cada caldera y las restricciones de tipo medio ambientales vigentes. Esto depende de la correcta estimación de las cantidades a consumir y el cumplimiento de las restricciones que se tengan en ese momento, como por ejemplo mitigación del riesgo de desabastecimiento definiendo un stock mínimo, es decir efectuar una **Gestión del Inventario**.

Con una correcta estimación en las cantidades a consumir, junto con una adecuada gestión de las distintas calidades del carbón es posible obtener un flujo PULL incorporando la actual estructura de los contratos con que cuenta la empresa generadora que abastece a la central “Ejemplo”, no obstante se pueden determinar mejoras al proceso. En donde los beneficios podrían estar en el caso de detectar sobre stock del carbón, conllevando una reducción del promedio anual del capital inmovilizado del carbón. Además de los ahorros financieros producto de esta situación, así como de la reducción producto de la degradación de del carbón, la que es causada por la permanencia prolongada del material que está acopiado a la intemperie y los potenciales efectos que ejerce la lluvia sobre éste, provocando una disminución ostensiblemente las características físicas del mineral.

Por otro lado, para el caso de detectar un substock, los beneficios que se podría generar corresponden a un mejor manejo del riesgo del desabastecimiento, conllevando reducción de multas y posibles penalizaciones asociadas, así como también la reducción del lucro cesante o energía que se deja de vender por bajo stock de combustible.

Aunque este último escenario tiene una relación directa con el carbón destinado para consumo, que tiene como el principal efecto incorporar otro tipo de costos, como son; costos de stock o almacenamiento, deterioros, pérdidas y degradación del carbón almacenado, entre ellos además habría que incluir los costos por las rupturas de stock ya sea por sobre el máximo definido o bajo el mínimo establecido. En este caso las componentes fundamentales son por un lado el costo financiero del capital que se encuentra inmovilizado para definir un stock máximo y el cumplimiento de la normativa que regula el “Pago por Confiabilidad” en cuanto al aseguramiento de combustible para la generación eléctricas de la central “Ejemplo” para definir un stock mínimo.

Lo indicado anteriormente es posible resumir en el siguiente esquema:

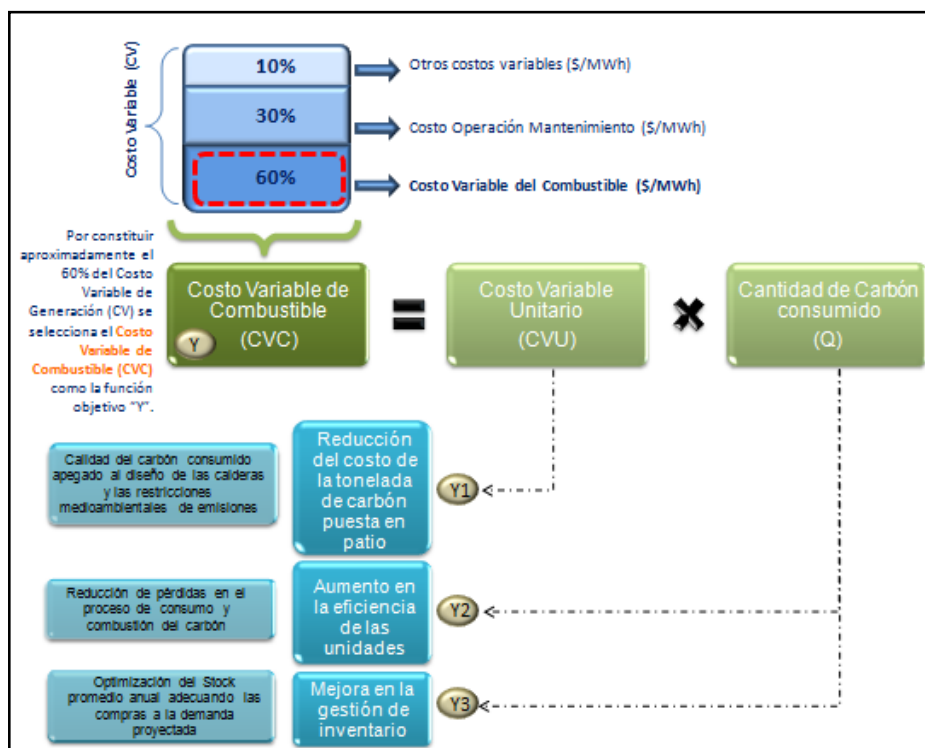


Figura N° 27. Esquema del cálculo de costo variable para la central “Ejemplo”. (Endesa Colombia, 2013)

De la figura mostrada y considerando que ésta última propuesta mostrada en el esquema de la figura N°9 - “Mejora en la Gestión de Inventario” (Y3), tiene un efecto directo y significativo sobre otros costos que son básicamente financieros y que sólo tiene una relación directa en el costo variable del combustible en lo que tiene relación al manejo de patio para evitar la degradación del carbón almacenado, hemos decidido no desarrollar esta iniciativa en el marco del presente trabajo, no obstante sólo se analizará lo relativo al grado de degradación del carbón acopiado a la intemperie por el efecto que ejerce la lluvia, lo que se menciona en el punto 8.3 del presente trabajo.

De este modo las acciones relacionadas con propuestas en la reducción del costo unitario del carbón (Y1) afectarán a la iniciativa asociada a la eficiencia de las unidades de generación (Y2) de la central “Ejemplo”. Además ambas están directamente relacionadas con el cálculo actual del costo variable de generación. Las acciones de mejora de una iniciativa pueden afectar a la otra, por ejemplo las mejoras que surjan como resultado de la evaluación en las características de carbón de consumo y su apego a las especificaciones de diseño de las calderas, puede afectar positivamente el costo unitario, no obstante si los cambios efectuados modifican las características del carbón de consumo, podrían también afectar positivamente o negativamente a la eficiencia de las unidades de generación.

Por esto último, es importante precisar que este trabajo estará orientado a validar el análisis de las dos primeras iniciativas identificadas como (Y1 e Y2), las que serán

tratadas como acciones independientes para las que se consideran beneficios y costos asociados respecto al real efecto que aporten cada una y no en su conjunto a modo de simplificar la entrega de los resultados del presente trabajo.

a) Definición de indicador para Y1.

Nombre de la iniciativa: “Reducción del costo variable unitario del combustible, utilizando mezclas de carbón”.

Indicador: Precio de Inventario.

Unidad: Cop/Ton (Pesos colombianos/Toneladas)

Características del indicador: Corresponde al precio de la tonelada de carbón puesta en la pila o patio de acopio y se calcula mensualmente mediante el sistema contable de la empresa, como el ponderado mensual de las liquidaciones a proveedores de carbón, lo que incluye el precio de la tonelada propiamente tal y los costos de transporte en camiones y descarga en la pila correspondiente.

b) Definición de indicador para Y2.

Nombre de la iniciativa: “Mejora de la eficiencia en el consumo de combustible de las unidades de generación”.

Indicador: Consumo específico.

Unidad: Kcal/kWh

Características del indicador: Corresponde al calor necesario en kilo calorías para generar un kilowatt hora de energía eléctrica y se mide diariamente por medio de los componentes de instrumentación disponibles en la central “Ejemplo”, siguiendo un procedimiento definido para completar el informe diario de operación.

5.4 Rendimiento actual de la central “Ejemplo” (Línea Base).

5.4.1 Situación actual de costo unitario del carbón con datos a Mayo de 2013.

Con la información obtenida en la central “Ejemplo”, la que fue ordenada y consolidada hasta Mayo de 2013, podemos indicar que para el subproceso a mejorar que corresponde a la “**Gestión de Combustible**” en lo que refiere al carbón, el que reportó para el año 2012 ingresos a la central del orden de 245.000 toneladas, con un precio de compra promedio para el mismo año de \$142.859 COP/Ton. El mineral con un poder calorífico superior al especificado para los contratos que corresponde a 6.900 Kcal/Kg (Poder calorífico mínimo

aceptado), el que corresponde a una cifra aproximada por concepto de compra de combustible igual a 19 millones de dólares para el mismo año.

Más adelante en la página 112, se explicará en detalle el subprocesos correspondiente, no obstante es importante señalar que el objetivo de este proceso es el de mantener la cantidad de combustible necesario para la operación del centro de producción según las proyecciones presupuestarias basadas en el POA (Presupuesto Operativo Anual) de la empresa de generadora. Así mismo es requisito poder demostrar al ente regulador (CREG – Comisión de Regulación de Energía y Gas), los pagos por confiabilidad, con el respaldo de contratos vigentes a 5 años por un total de 765.000 toneladas al año.

Con el fin de cumplir los objetivos del proceso y considerando las especificaciones técnicas determinadas de la central “Ejemplo”, la empresa generadora ha firmado contratos con un horizonte a 5 años con 25 proveedores de las localidades de Cundinamarca y Boyacá, de los cuales el 95% de éstos son productores y solo un 5% corresponde a comercializadores del mineral. Según el proceso de abastecimiento cada proveedor tiene una cuota de entrega establecida, de acuerdo a su capacidad de producción, la que debe ser entregada a la central mensualmente.

Para cumplir con lo anterior, cada proveedor traslada diariamente el carbón desde el origen de la extracción hasta la central “Ejemplo” por medio de camiones que son subcontratados por los mismos proveedores. Con cada proveedor se pacta un precio unitario por el carbón suministrado tomando como valor de referencia la especificación de calidad que fue definida en las bases de licitación, la que exige un poder calorífico superior mayor a 6900 kcal/Kg y un porcentaje de ceniza inferior al 15%, entre otros parámetros. En tanto la cuota pactada como los parámetros de calidad antes mencionados, tienen cláusulas de castigo en el precio pagado en caso de no cumplimiento o una compensación y/o bono en caso de cumplimiento.

Mensualmente se calcula el costo de la tonelada de carbón almacenada en el patio de acopio como costo unitario de inventario, valor que es utilizado para calcular el costo variable de generación, tal como se muestra en la Figura N° 26. Para lo anterior se consideran los pagos por el mineral y el valor del traslado que es cancelado a cada proveedor.

Para efectuar el análisis de la situación actual se recopilaron datos de precios mensuales ponderados reliquidados a cada proveedor, es decir corresponde a los pagos efectuados luego de efectuar los ajustes por el cumplimiento de suministro y calidad para cada uno de los proveedores. Para lo anterior se consideró un total de muestra con 98 datos tomados durante el primer semestre de 2013, entre los meses de Enero a Mayo (Disponibilidad de información brindada por la empresa generadora). Fue seleccionado como horizonte de la muestra 5 meses, debido a que con esta información es posible contar con los precios a una misma base comparativa debido a la indexación del IPC durante el mismo período semestral, los valores anteriores contienen precios de referencia que estaban desactualizados para traerlos a valor presente ya que poseen otra base de cálculo de IPC.

Las siguientes tablas muestran los datos correspondientes a los pagos efectuados durante los meses de Enero a Mayo 2013. (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

Enero 2013.

No hubo ingresos de carbón a la central.

Febrero 2013.

Tabla N° 12. Pagos realizados por carbón en Febrero 2013.

Dato N°	N° proveedor	Proveedor	Fecha	Precio Reliquidado Mensual [COP/Ton]
1	27	Carbones San Fernando	02-2013	127937
2	35	Misael Castillo Castro	02-2013	129697
3	42	Cooprocarbon Sugamuxi	02-2013	135202
4	43	Cooprocarbon Sugamuxi	02-2013	135633
5	100	Ricardo Mestizo Reyes	02-2013	123363
6	114	Mina Los nevados CIA Ltda	02-2013	124720
7	115	Minminer S.A.	02-2013	131148
8	138	P3 Carbonera los pinos	02-2013	128244
9	300	Cooperativa Agrominera Multiactiva	02-2013	128727
10	301	Cooperativa Agrominera Multiactiva	02-2013	137200
11	302	Cooperativa Agrominera Multiactiva	02-2013	142975
12	400	Carbones del Gibraltar S.A.	02-2013	124927
13	401	Inversiones Pinzón Martínez S.A.	02-2013	129054
14	500	Procarbon	02-2013	126416
15	1560	Cooprotraboy Ltda	02-2013	131640
16	1590	Juan Hely Fajardo	02-2013	137870
17	1620	Luis carlos garnica garnica	02-2013	138305
18	1630	Reinaldo lopez fernandez	02-2013	132604
19	1650	Edgar Octavio Perez Vanegas	02-2013	131264
20	1670	Sanoha Ltda	02-2013	141824
21	1680	Coincarboy Ltda	02-2013	133201
22	1690	Carboneras San Jose	02-2013	135629
23	1700	Domiciano Perez	02-2013	128445
24	1710	Dora Isabel Agudelo Estepa	02-2013	145621
25	1720	Emprocoal A&V	02-2013	123995

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

Marzo 2013

Tabla N° 13. Pagos realizados por carbón en Marzo 2013

Dato N°	N° proveedor	Proveedor	Fecha	Precio Reliquidado Mensual [COP/Ton]
26	27	Carbones San Fernando	03-2013	145430
27	35	Misael Castillo Castro	03-2013	176294
28	42	Cooprocarbon Sugamuxi	03-2013	132264
29	43	Cooprocarbon Sugamuxi	03-2013	187276
30	100	Ricardo Mestizo Reyes	03-2013	160306
31	114	Mina Los nevados CIA Ltda	03-2013	158713
32	115	Minminer S.A.	03-2013	152486
33	138	P3 Carbonera los pinos	03-2013	173773
34	300	Cooperativa Agrominera Multiactiva	03-2013	132999
35	301	Cooperativa Agrominera Multiactiva	03-2013	124872
36	302	Cooperativa Agrominera Multiactiva	03-2013	241192
37	400	Carbones del Gibraltar S.A.	03-2013	160804
38	401	Inversiones Pinzón Martinez S.A.	03-2013	166274
39	500	Procarbon	03-2013	184744
40	1560	Cooprotraboy Ltda	03-2013	175202
41	1590	Juan Hely Fajardo	03-2013	170025
42	1630	Reinaldo lopez fernandez	03-2013	167922
43	1650	Edgar Octavio Perez Vanegas	03-2013	168662
44	1670	Sanoha Ltda	03-2013	168872
45	1680	Coincarboy Ltda	03-2013	156936
46	1690	Carboneras San Jose	03-2013	171253
47	1700	Domiciano Perez	03-2013	165825
48	1720	Emprocoal A&V	03-2013	157232

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

Abril 2013.

Tabla N° 14. Pagos realizados por carbón en Abril 2013

Dato N°	N° proveedor	Proveedor	Fecha	Precio Reliquidado Mensual [COP/Ton]
49	27	Carbones San Fernando	04-2013	137314
50	35	Misael Castillo Castro	04-2013	142111
51	42	Cooprocarbon Sugamuxi	04-2013	132345
52	43	Cooprocarbon Sugamuxi	04-2013	148470
53	100	Ricardo Mestizo Reyes	04-2013	131966
54	114	Mina Los nevados CIA Ltda	04-2013	139243
55	115	Minminer S.A.	04-2013	140628
56	138	P3 Carbonera los pinos	04-2013	137133
57	300	Cooperativa Agrominera Multiactiva	04-2013	130402
58	301	Cooperativa Agrominera Multiactiva	04-2013	124958
59	302	Cooperativa Agrominera Multiactiva	04-2013	158401
60	400	Carbones del Gibraltar S.A.	04-2013	135652
61	401	Inversiones Pinzón Martinez S.A.	04-2013	138894
62	500	Procarbon	04-2013	136602
63	1560	Cooprotraboy Ltda	04-2013	149423
64	1590	Juan Hely Fajardo	04-2013	149144
65	1620	Luis carlos garnica garnica	04-2013	138169
66	1630	Reinaldo lopez fernandez	04-2013	153593
67	1650	Edgar Octavio Perez Vanegas	04-2013	144537
68	1670	Sanoha Ltda	04-2013	144763
69	1680	Coincarboy Ltda	04-2013	150256
70	1690	Carboneras San Jose	04-2013	143301
71	1700	Domiciano Perez	04-2013	137653
72	1710	Dora Isabel Agudelo Estepa	04-2013	147155
73	1720	Emprocoal A&V	04-2013	132672

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

Mayo 2013.

Tabla N° 15. Pagos realizados por carbón en Mayo 2013.

Dato N°	N° proveedor	Proveedor	Fecha	Precio Reliquidado Mensual [COP/Ton]
74	27	Carbones San Fernando	05-2013	134914
75	35	Misael Castillo Castro	05-2013	140180
76	42	Cooprocarbon Sugamuxi	05-2013	132867
77	43	Cooprocarbon Sugamuxi	05-2013	168502
78	100	Ricardo Mestizo Reyes	05-2013	136725
79	114	Mina Los nevados CIA Ltda	05-2013	134980
80	115	Minminer S.A.	05-2013	140049
81	138	P3 Carbonera los pinos	05-2013	144440
82	300	Cooperativa Agrominera Multiactiva	05-2013	132500
83	301	Cooperativa Agrominera Multiactiva	05-2013	127543
84	302	Cooperativa Agrominera Multiactiva	05-2013	154998
85	400	Carbones del Gibraltar S.A.	05-2013	126304
86	401	Inversiones Pinzón Martinez S.A.	05-2013	139441
87	500	Procarbon	05-2013	136176
88	1560	Cooprotraboy Ltda	05-2013	146716
89	1590	Juan Hely Fajardo	05-2013	146230
90	1620	Luis carlos garnica garnica	05-2013	137281
91	1630	Reinaldo lopez fernandez	05-2013	147355
92	1650	Edgar Octavio Perez Vanegas	05-2013	144310
93	1670	Sanoha Ltda	05-2013	146510
94	1680	Coincarboy Ltda	05-2013	147237
95	1690	Carboneras San Jose	05-2013	141807
96	1700	Domiciano Perez	05-2013	137654
97	1710	Dora Isabel Agudelo Estepa	05-2013	156699
98	1720	Emprocoal A&V	05-2013	131751

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

A continuación se muestra un histograma con un resumen gráfico para la colección de la muestra de datos presentadas en las tablas anteriores.

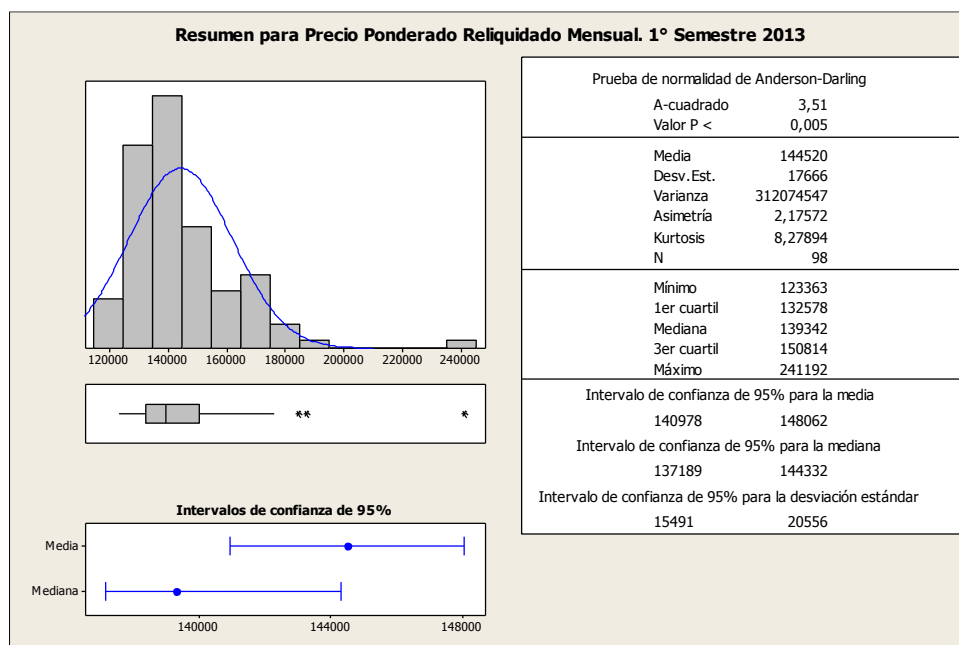


Figura N° 28. Histograma con el precio reliiquidado del carbón para 1er semestre de 2013.
(Elaborado por los autores de esta tesis)

De la gráfica anterior se obtiene una media de 144.520 COP/Ton, además se obtiene un valor de $P < 0,05$, que significa que los datos no poseen una distribución normal. **Por otro lado los valores extremos superiores deben ser estudiados.**

5.4.2 Definición de meta a alcanzar para el costo unitario del carbón.

Desde la promulgación en el año 2009 de la nueva resolución ambiental N° 909 se efectuaron previamente una serie de mejoras a la central “Ejemplo”, con el propósito de poder cumplir con las nuevas exigencias de emisiones. Entre las medidas efectuadas con especial foco para cumplir con el material particulado podemos mencionar las siguientes:

- a) Reparaciones y modificaciones de diseño en los Precipitadores Electroestáticos de las cuatro unidades de generación, los que estaban diseñados para lograr emisiones de particulado hasta 200 mg/m^3 , pero la nueva resolución estableció como limite 100 mg/m^3

Los resultados obtenidos de las mejoras preliminares efectuadas en los Precipitadores electrostáticos se muestran en la siguiente gráfica. (mejoras anteriores fuera de este trabajo).

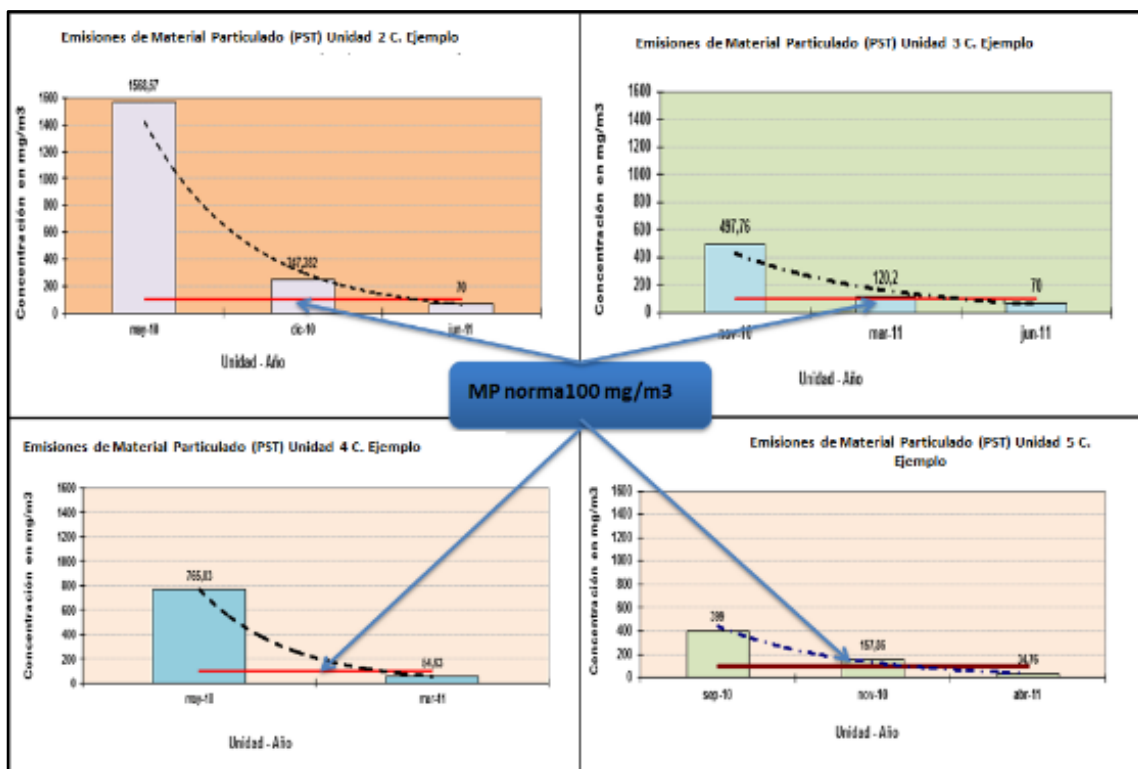


Figura N° 29. Gráfica con los resultados con la implementación en los Precipitadores Electroestáticos. (Endesa Colombia, 2011)

b) Cambio en las especificaciones técnicas de suministro de carbón, con el propósito de aumentar la exigencia del poder calorífico de 5900 Kcal/Kg a 6900 Kcal/Kg, con el propósito de bajar el porcentaje de ceniza del mineral del 22% a menos del 15%, lo cual tendría un impacto directo en la reducción de emisiones. Parte de la mejora que afectó este proceso consistió en la ampliación de la cantidad de proveedores de carbón de 9 a 25.

Los resultados obtenidos luego del cambio de especificaciones técnicas del carbón de ingreso y hasta el momento de entrada en vigencia de la nueva resolución son los siguientes:

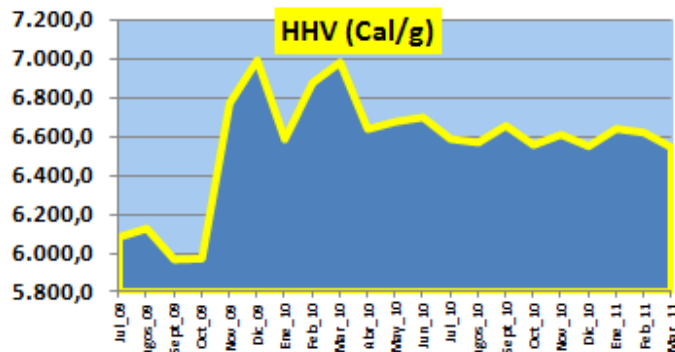


Figura N° 30. Resultados de Poder Calorífico Superior (HHV), producto del aumento en la calidad térmica del carbón. (Endesa Colombia, 2011)

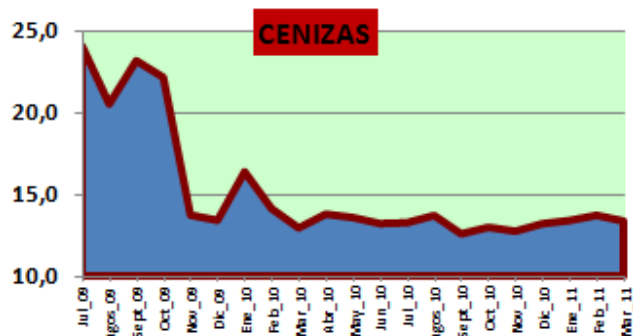


Figura N° 31. Resultados de Porcentaje de Ceniza, producto del aumento en la calidad térmica del carbón. (Endesa Colombia, 2011)

Tabla N° 16. Especificaciones técnicas del carbón que debe suministrarse a las calderas de la central "Ejemplo".

	Boiler No. 1	Boiler No. 2	Boiler No. 3
<u>Metric Units</u>			
Steam generated, kg/hr.	136,000	155,600	276,000
Coal (as fired basis), kg/hr.	20,050	16,145	35,627
Coal analysis:			
Higher heating value (dry basis), k cal/kg.	4590	7000	6000
Ash (dry basis) %	30	9.5	24.2
Moisture %	10	5	9

Fuente: (Distral S.A, 1981) (Hitachi S.A, 1964)

Por otro lado las especificaciones de diseño de las calderas indican que para las unidades 3, 4 y 5 se requiere un poder calorífico superior de 6.000 kcal/kg y 24,9 % de Ceniza como máximo, mientras que para la unidad 2 se requiere un poder calorífico superior de 7.000 Kcal/Kg, con 9,5 % de Ceniza como máximo, según se muestra en la Tabla N°16.

Para reducir el costo unitario del carbón ingresado a la central “Ejemplo”, necesariamente se debe reducir la calidad en cuanto a poder calorífico. Para ello se debe considerar un punto de equilibrio entre el poder calorífico asociado y al porcentaje de ceniza actual de las especificaciones de diseño de las calderas para que cumpla con la resolución N° 909 de emisiones.

Lo anterior fue tomando como base que las modificaciones de diseño o mejoras preliminares en los precipitadores que ya fueron realizadas.

Al evaluar los resultados de las emisiones que se muestran en la Figura N° 29 luego de aplicar los cambios en cada uno de los precipitadores electrostáticos de las unidades de generación de la central “Ejemplo”, es posible experimentar con el comportamiento de un carbón de consumo de menor poder calorífico y uno de mayor ceniza que el actual y por tanto de un menor costo unitario, con el propósito de aprovechar las holguras que existen entre las emisiones actuales y las exigidas por la resolución N°909. En especial en las unidades donde se observan las mayores holguras son las correspondientes a la unidad N°5 (real: 34,76 mg/m³ v/s Resolución 909:100 mg/m³) y la unidad N°4 (real: 54,63 mg/m³ v/s Resolución 909:100 mg/m³).

Como parte de este trabajo de tesis se buscó diferentes alternativas para lograr conseguir un carbón de menor costo que cumpla las restricciones de emisiones medio ambientales, entre las que se sugirió efectuar mezclas del carbón comprado actualmente con un carbón de menor calidad, lo anterior tiene la ventaja de que no se requiere modificar los actuales contratos, sino que sólo modificar las cantidades de los pedidos y buscar a un proveedor adicional cuyo producto sirva para ser mezclado con el carbón que se tiene en la pila.

Esta situación al momento de este análisis no se realizaba, es decir la pila de carbón para las unidades N° 3, 4 y 5 era una sola y para la unidad N°2 otra pila distinta, dado las diferencias que tienen en las especificaciones de diseño de cada caldera, pero que en ningún caso se efectúan mezclas de carbones al interior de la central. La mezcla sólo se produce naturalmente por las descargas de material que efectúan los distintos proveedores en cada pila, para lo cual cada proveedor tiene asignada su pila de descarga, según se encuentra establecido en un procedimiento operativo que se cumple en la práctica en el patio de la central “Ejemplo”.

Con el propósito de evaluar las posibilidades y efectuar una prueba real de las mezclas de carbón, se buscó un producto que pudiese cumplir con las necesidades antes indicadas pudiendo utilizar un carbón mixto, el que es residuo del proceso de coquización del carbón., Este material es posible encontrarlo en varias empresas de este rubro que están instaladas en zonas cercanas a la central “Ejemplo”. Finalmente para hacer la prueba real se adquirieron

20.000 toneladas de carbón mixto provenientes de la empresa coquizadora MILPA cuyas características en poder calorífico fueron de 5096 Kcal/Kg y 32,81 % de ceniza.

En mayo de 2013 se efectuaron pruebas de generación en la Unidad N°5 durante 5 días corridos, utilizando **mezclas** de carbón con características de compra actuales y carbón mixto (proveniente de MILPA) en distintos porcentajes obteniéndose los siguientes resultados:

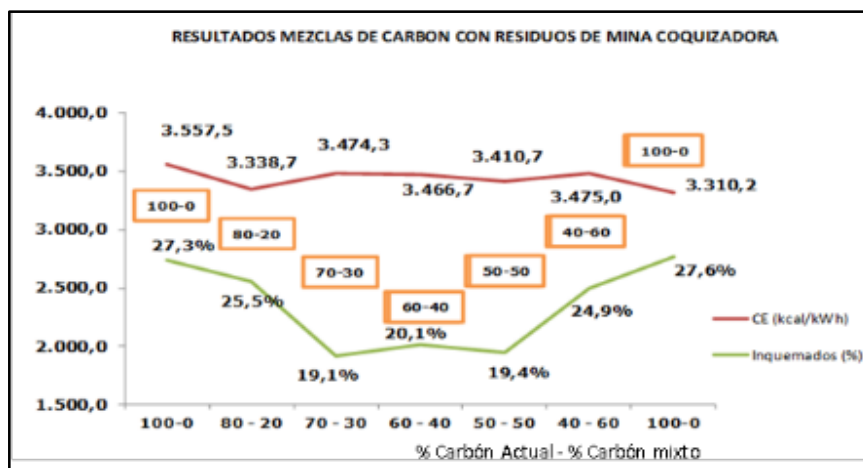


Figura N° 32. Gráficas para el Consumo Específico (CE) y Porcentaje de Inquemados, obtenidos en pruebas de mezclas de carbón en la central “Ejemplo” (Área de operaciones Central "Ejemplo", mayo 2013)

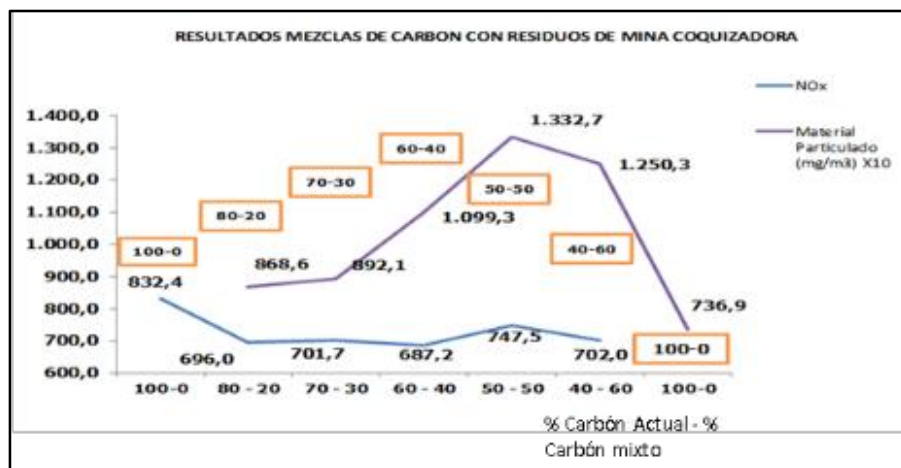


Figura N° 33. Gráficas para NOX y Material Particulado, obtenido en pruebas de mezclas de carbón en la central “Ejemplo” (Área de operaciones Central "Ejemplo", mayo 2013)

De acuerdo a los resultados obtenidos es posible apreciar que el uso de mezclas no desmejora el consumo específico de combustible de la unidad que como veremos más adelante

tiene relación con la eficiencia en el consumo de combustible para generar la energía eléctrica, e incluso en algunas combinaciones de porcentajes de mezclas se obtuvo hasta un menor consumo con una disminución importante del porcentaje de inquemados, que es una de las principales causas de pérdidas de eficiencia de la central, lo que será también motivo de revisión en una etapa de análisis posterior. Otra observación importante producto de los resultados es que la variable que restringe el uso de mezclas es la emisión de material particulado, en la prueba se obtuvo que para el carbón mixto utilizado se puede efectuar una mezcla de hasta 60% carbón actual y 40% de carbón mixto para cumplir con la resolución N° 909 de 100 mg/m³.

Como en el futuro puede que sean otras las características del carbón mixto a utilizar, para el caso de obtener mejor poder calorífico y ceniza, hemos decidido proponer un criterio conservador con 80% carbón actual y 40% de carbón mixto para establecer nuestra meta como la mezcla a utilizar, con ello será posible abastecer sólo a las unidades N°4 y N°5, dado que son las que presentan las mayores holguras en el cumplimiento de emisiones en sus precipitadores electrostáticos.

Por otro lado, de las cotizaciones recibidas durante el mes de mayo de 2013 por entregas de carbón mixto de parte de algunas empresas coquizadoras de la zona se pudo establecer un precio de referencia de 70.000 COP/Ton incluyendo el transporte en camiones hasta la central.

Con estos datos el objetivo para alcanzar lo definimos como conseguir un precio equivalente al precio de tonelada de la mezcla equivalente al 80% de carbón actual (Precio Promedio Ponderado de 1° semestre 2013 = 144.520 COP/Ton) y un 20% de un carbón de residuos (Precio ofertado = 70.000 COP/Ton), **calculando obtenemos un precio equivalente a 129.616 COP/Ton, para la pila de carbón que se deberá suministrar para las unidades N°4 y N°5, con ello se reduce en un 10.31% el costo unitario actual del carbón a comprar.**

Posteriormente en las etapas siguientes de medición y análisis se podrá entregar resultados de cambios necesarios en la operatividad para llevar a cabo esta reducción, indicando costos e inversiones relacionadas a los beneficios conseguidos.

5.4.3 Evaluación del impacto financiero para la reducción del costo unitario del carbón.

Como punto de partida se tiene que el costo variable unitario de inventario es 144.520 COP/Ton. De las pruebas de generación efectuadas en la unidad N°5 a través de la utilización de mezclas de carbón actual con carbón mixto realizadas en mayo de 2013, se estima que es posible alcanzar una mezcla de 60% - 40% (Carbón Actual – Carbón Mixto) como la condición aceptable límite en cuanto a material particulado.

Nuestro objetivo definido en la etapa anterior fue alcanzar un 80% - 20% de mezcla de carbón actual con carbón mixto para la alimentación de las unidades N°4 y N°5 sin considerar

la generación con mezclas para las unidades N°2 y N°3 dado que los precipitadores de estas unidades se encuentran con menor holgura de alcanzar el nivel de emisiones exigido por la resolución 909, además de tener una meta conservadora producto de nuestro primer análisis.

Los beneficios económicos esperados son:

Calculo de Ahorros:

A. Costo unitario actual del carbón en inventario = 144.520 COP/Ton

B. Costo unitario del residuo = 70.000 COP/Ton

Considerando un porcentaje de mezcla 80% de A y 20 % de B, se tienen un nuevo costo unitario del carbón en pila

$$= 144.520 \times 0,8 + 70.000 \times 0,2$$

$$= 129.616 \text{ COP/Ton}$$

Ahorro esperado por tonelada = 14.904 COP/Ton

Considerando el consumo de carbón proyectado en el POA (Presupuesto Operativo Anual) para el año 2014, con los niveles actuales de eficiencia en los consumos de las unidades N° 4 y N° 5 se tiene un total previsto de 122.189 Toneladas.

Con lo anterior el ahorro total es de

$$= 14.409 \text{ COP/Ton} \times 122.189 \text{ Ton}$$

$$= 1.760.621.301 \text{ COP/Año.}$$

Considerando un tipo de cambio igual 1.800 COP/USD, el beneficio en dólares queda:

= 978.122,45 USD/Año

Otros **beneficios** no cuantificados en esta etapa fueron:

- Mayor margen variable por disminución de costo variable unitario del combustible al disminuir el precio de la tonelada consumida,
- Mayor ingreso por venta de energía, es decir mayores despachos producto de un menor precio de oferta, que relaciona un menor costo de generación por menor costo variable del combustible.
- Si hay mayor despacho de la central, el consumo de carbón aumenta por tanto aumenta el costo total pero el costo unitario se mantiene, por lo que el beneficio calculado anteriormente sería mayor.

Posibles **costos** no cuantificados en esta etapa:

- Mayor utilización de maquinaria para ejecutar mezcla en patio de carbón o mayor costo de suministro de carbón ya mezclado según la especificación solicitada (80%-20%).
- Posible utilización de maquinaria en el patio de ceniza, en caso que este residuo aumente producto de mayor consumo por posible mayores despachos y por aumento de emisiones de material particulado dada la reducción del poder calorífico de la mezcla.

- Posible mayor mantenimiento de equipos, tales como aumento en frecuencia de limpieza de caldera (Deshollinado) producto de un mayor porcentaje de ceniza de la mezcla resultante.

5.4.4 Situación actual de consumo específico de carbón en las unidades de generación. Análisis efectuado durante el mes de Mayo 2013.

Actualmente el control de la eficiencia del consumo del combustible en centrales térmicas de la compañía generadora se realiza por medio del cálculo del “Consumo Especifico”.

Para comprender la situación actual de las unidades de generación debemos explicar éste concepto.

Definición de Consumo Especifico.

Para entender éste concepto es importante definir inicialmente que es el **Rendimiento** de una central de generación térmica, el que corresponde a la razón entre el trabajo utilizado y el trabajo proveído, se puede simplificar como el porcentaje de la potencia producida respecto a la potencia proveída.

En el siguiente esquema se muestran las principales etapas de un sistema de transformación de energía en una central térmica, en donde se ejemplifica el cálculo del rendimiento de una central térmica convencional.

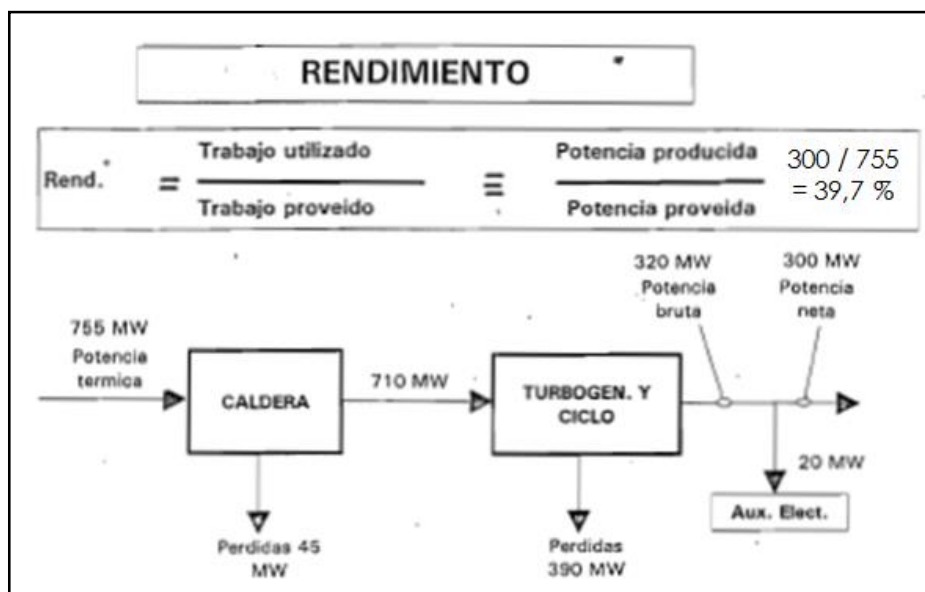


Figura N° 34. Fórmula para el cálculo del rendimiento del sistema generación térmica. (Grupo Endesa, 2002)

El rendimiento calculado en el ejemplo del esquema anterior corresponde al “Rendimiento Neto”, ya que considera la potencia entregada al sistema eléctrico o cliente final. Si el cálculo se realiza usando la potencia producida en bornes de salida del generador, es decir antes del consumo eléctrico propio de la central denominado “consumo de servicios auxiliares” y el rendimiento sería bruto.

Luego el **Consumo Específico** se define como la cantidad de calor necesaria para producir un kWh de Energía Eléctrica.

Considerando el la equivalencia térmica de la energía eléctrica como:

Tabla N° 17. Equivalencia térmica del kWh

EQUIVALENTE TERMICO DEL kWh
860 Kcal = 1 kWh

Fuente: (Grupo Endesa, 2002)

El Consumo Especifico se calcula como:

Tabla N° 18. Fórmula de cálculo del Consumo Específico.

$$C_e = \frac{860}{1 * (Rend)} \frac{Kcal}{kWh}$$

Fuente: (Grupo Endesa, 2002)

Del ejemplo anterior podemos decir que el Consumo Específico es de 2.166,25 [Kcal/kWh]

Ahora para el análisis de la situación actual del consumo especifico de las distintas unidades de la central “Ejemplo”, se extrajeron datos del comportamiento del consumo especifico de cada unidad, los cuales se calculan diariamente y posteriormente son registrados en los informes diarios de operación de la central, con ésta información se generaron los gráficos estadísticos necesarios para estudiar la variabilidad de proceso y lograr comprobar si los datos muestrales cumplen con las especificaciones preestablecidas.

Si en el caso de apreciar en los gráficos tendencias no aleatorias o muestras que se sitúen más allá de los límites de control, consideramos que el proceso está fuera de control. Si esto ocurre, se debe estudiar y averiguar las causas que afectan al proceso analizado.

El horizonte de datos para la muestra tomada de consumo especifico de las distintas unidades fue considerada desde Octubre de 2010 hasta Mayo 2013, para lo cual se han seleccionado los valores obtenidos de aquellos días cuando las unidades han generado a plena capacidad, sin variaciones de carga en régimen estable durante todo el día, con el propósito de

descartar una serie de situaciones que requeriría el estudio estadístico distinto. Por ejemplo el consumo específico durante paradas y arranques de una unidad de generación, situación que puede prolongarse por más de 12 horas y cuyo resultado de consumo sería mucho mayor, lo mismo ocurre para el caso de generación en distintos niveles de carga aunque esta se mantenga estable en el tiempo, no se podrían comparar los consumos específicos, situación que se asemeja al caso de un motor a combustión de un vehículo, el cual consume mayor cantidad de combustible cuando se acelera y a distintas revoluciones por minuto por debajo o por encima de su punto óptimo, por lo tanto solo se consideró la medición del consumo específico cuando la unidad estuvo generando a plena carga durante el día. Esta situación es la habitual a menos que ocurran variaciones de carga por situaciones de desvío de la generación programada a causa de fallas internas de la central.

Con estos resultados podremos estudiar el comportamiento de las distintas unidades por separado y poder compararlas entre sí.

Tal como se ha explicado en este documento, las unidades de generación de la Central “Ejemplo” no están constantemente despachadas, por lo que los datos no corresponden a días continuos, sino a aquellos días en que efectivamente las unidades generaron y se dieron las condiciones explicadas en el párrafo anterior.

En las siguientes tablas se muestran las poblaciones con los datos de consumo específico diario recopilados para las cuatro unidades de generación de la central “Ejemplo”.

Tabla N° 19. Datos de consumo específico de las unidades de la central “Ejemplo”

Unidad N°2			Unidad N°3			Unidad N°4			Unidad N°5		
ID	Día	CE neto (kcal/kwh)	ID	Día	CE neto (kcal/kwh)	ID	Día	CE neto (kcal/kwh)	ID	Día	CE neto (kcal/kwh)
1	26-oct-10	3.062,1	1	06-jul-11	3.254,6	1	21-jul-11	3.144,0	1	29-sep-11	3.069,3
2	27-oct-10	3.027,7	2	26-jul-11	3.413,9	2	30-ago-11	3.360,1	2	02-abr-12	3.287,8
3	28-oct-10	3.096,5	3	09-ago-11	3.326,6	3	08-sep-11	3.022,0	3	23-jun-12	3.094,1
4	30-oct-10	3.094,9	4	12-ago-11	3.166,6	4	09-sep-11	3.384,6	4	24-jun-12	3.224,7
5	03-nov-10	3.058,0	5	23-ago-11	3.461,3	5	22-sep-11	3.184,8	5	22-ago-12	3.240,4
6	04-nov-10	3.058,8	6	25-ago-11	3.436,8	6	05-oct-11	3.417,2	6	23-ago-12	3.283,0
7	05-nov-10	3.111,8	7	26-ago-11	3.364,2	7	07-oct-11	3.312,2	7	27-ago-12	3.318,2
8	08-feb-11	3.032,6	8	07-sep-11	3.200,4	8	18-mar-12	3.285,4	8	28-ago-12	3.218,7
9	10-feb-11	2.943,6	9	13-sep-11	3.218,2	9	19-mar-12	3.317,7	9	31-ago-12	3.213,6
10	11-feb-11	3.034,1	10	29-nov-11	3.427,7	10	03-abr-12	3.051,8	10	06-sep-12	3.207,6
11	12-feb-11	2.962,7	11	26-ene-12	3.371,7	11	27-jun-12	3.205,4	11	07-sep-12	3.298,4
12	13-feb-11	3.024,6	12	28-ene-12	3.325,1	12	23-sep-12	3.160,4	12	08-sep-12	3.226,7
13	12-jun-11	2.997,4	13	03-feb-12	3.284,6	13	26-sep-12	3.201,6	13	09-sep-12	3.260,9
14	28-ene-13	2.963,1	14	11-feb-12	3.436,0	14	27-sep-12	3.166,7	14	11-sep-12	3.177,3
15	29-ene-13	2.952,8	15	11-jun-12	3.160,0	15	28-sep-12	3.346,0	15	12-sep-12	3.210,6
16	30-ene-13	2.949,4	16	13-jun-12	3.177,6	16	29-sep-12	3.299,8	16	13-sep-12	3.175,2
17	31-ene-13	2.941,0	17	15-jun-12	3.329,1	17	30-sep-12	3.186,7	17	14-sep-12	3.281,9
18	01-feb-13	2.959,6	18	17-jun-12	3.467,0	18	01-oct-12	3.218,1	18	17-sep-12	3.033,0
19	02-feb-13	2.950,2	19	18-jun-12	3.466,1	19	02-oct-12	3.262,5	19	20-sep-12	3.120,3
20	03-feb-13	2.950,2	20	20-jun-12	3.437,1	20	03-oct-12	3.404,2	20	21-sep-12	3.248,7
21	05-feb-13	3.084,7	21	31-ago-12	3.365,9	21	04-oct-12	3.270,5	21	22-sep-12	3.149,7
22	06-feb-13	3.080,2	22	01-sep-12	3.348,6	22	05-oct-12	3.403,0	22	23-sep-12	3.151,1
23	07-feb-13	3.082,5	23	06-sep-12	3.446,0	23	06-oct-12	3.251,8	23	24-sep-12	3.320,2
24	08-feb-13	3.078,4	24	07-sep-12	3.367,7	24	09-oct-12	3.108,9	24	26-sep-12	3.180,0
25	09-feb-13	3.077,1	25	08-sep-12	3.397,9	25	10-oct-12	3.153,1	25	27-sep-12	2.964,2
26	10-feb-13	3.075,9	26	09-sep-12	3.447,3	26	11-oct-12	3.065,7	26	28-sep-12	3.292,0
27	11-feb-13	3.075,6	27	19-sep-12	3.292,8	27	15-oct-12	3.258,2	27	29-sep-12	3.108,5
28	12-feb-13	3.083,6	28	20-sep-12	3.376,3	28	16-oct-12	3.011,5	28	03-oct-12	3.039,8
29	13-feb-13	3.082,4	29	22-sep-12	3.240,3	29	19-oct-12	3.339,3	29	04-oct-12	3.160,7
30	14-feb-13	3.028,8	30	23-sep-12	3.442,0	30	21-oct-12	3.213,7	30	05-oct-12	3.246,6
31	15-feb-13	3.025,7	31	24-sep-12	3.279,7	31	24-oct-12	3.241,1	31	07-oct-12	3.240,7
32	18-feb-13	3.022,1	32	26-sep-12	3.420,6	32	06-dic-12	3.365,6	32	08-oct-12	3.047,3
33	19-feb-13	3.021,3	33	27-sep-12	3.448,9	33	07-dic-12	3.159,9	33	21-oct-12	3.251,5
34	20-feb-13	3.022,6	34	28-sep-12	3.231,7	34	08-dic-12	3.302,4	34	22-oct-12	3.118,1
35	21-feb-13	3.022,3	35	29-sep-12	3.469,5	35	10-dic-12	3.288,0	35	03-dic-12	3.262,2
36	06-mar-13	3.022,0	36	30-sep-12	3.426,6	36	11-dic-12	3.305,7	36	21-dic-12	3.290,7
37	07-mar-13	3.021,1	37	01-oct-12	3.236,4	37	13-dic-12	3.000,5	37	25-dic-12	3.044,1
38	08-mar-13	3.020,5	38	03-oct-12	3.149,7	38	14-dic-12	3.364,6	38	11-ene-13	3.007,4
39	09-mar-13	3.023,9	39	04-oct-12	3.405,4	39	15-dic-12	3.362,1	39	12-ene-13	3.005,2
40	10-mar-13	3.022,2	40	06-oct-12	3.476,2	40	16-dic-12	3.502,2	40	13-ene-13	3.051,2
41	11-mar-13	3.020,0	41	07-oct-12	3.239,9	41	18-dic-12	3.255,5	41	14-ene-13	3.117,9
42	12-mar-13	3.020,3	42	09-oct-12	3.481,7	42	20-dic-12	3.263,7	42	15-ene-13	3.096,9
43	13-mar-13	3.021,8	43	10-oct-12	3.294,6	43	22-dic-12	3.268,4	43	16-ene-13	3.103,9
44	18-mar-13	3.022,4	44	18-oct-12	3.202,3	44	23-dic-12	3.362,7	44	17-ene-13	3.093,2
45	19-mar-13	3.023,3	45	19-oct-12	3.114,9	45	24-dic-12	3.142,5	45	18-ene-13	3.079,7
46	20-mar-13	3.022,0	46	20-oct-12	3.386,8	46	26-dic-12	3.233,4	46	19-ene-13	3.065,5
47	21-mar-13	3.022,4	47	21-oct-12	3.347,5	47	27-dic-12	3.150,0	47	20-ene-13	3.061,9
48	11-abr-13	3.031,3	48	22-oct-12	3.249,3	48	28-dic-12	3.315,6	48	21-ene-13	3.059,4
49	12-abr-13	3.028,9	49	24-oct-12	3.231,0	49	11-ene-13	3.243,0	49	23-ene-13	2.995,4
50	13-abr-13	3.028,8	50	25-oct-12	3.232,3	50	12-ene-13	3.344,8	50	24-ene-13	2.983,3
51	14-abr-13	3.027,4	51	05-dic-12	3.211,2	51	15-ene-13	3.344,0	51	03-feb-13	2.984,1
52	15-abr-13	3.029,8	52	11-dic-12	3.388,6	52	17-ene-13	3.319,5	52	06-feb-13	3.038,0
53	16-abr-13	3.026,4	53	12-dic-12	3.335,1	53	18-ene-13	3.097,2	53	12-feb-13	3.089,9
54	17-abr-13	3.023,1	54	13-dic-12	3.363,6	54	19-ene-13	3.266,1	54	13-feb-13	3.103,0
55	18-abr-13	3.006,9	55	29-ene-13	3.254,3	55	20-ene-13	3.109,2	55	14-feb-13	3.206,6
56	13-may-13	3.027,4	56	30-ene-13	3.442,8	56	23-ene-13	3.367,0	56	15-feb-13	3.264,5

Unidad N°2			Unidad N°3			Unidad N°4			Unidad N°5		
ID	Día	CE neto (kcal/kwh)	ID	Día	CE neto (kcal/kwh)	ID	Día	CE neto (kcal/kwh)	ID	Día	CE neto (kcal/kwh)
57	14-may-13	3.004,5	57	31-ene-13	3.446,2	57	25-ene-13	3.101,6	57	20-feb-13	3.036,0
58	15-may-13	3.005,1	58	01-feb-13	3.146,1	58	26-ene-13	3.326,4	58	21-feb-13	3.050,9
59	16-may-13	3.005,6	59	02-feb-13	3.172,4	59	28-ene-13	3.258,7	59	22-feb-13	3.059,6
60	17-may-13	3.006,1	60	14-feb-13	3.210,2	60	29-ene-13	3.367,0	60	23-feb-13	3.043,1
61	18-may-13	3.005,2	61	15-feb-13	3.209,0	61	30-ene-13	3.339,5	61	24-feb-13	2.975,9
62	19-may-13	3.023,7	62	24-feb-13	3.173,3	62	31-ene-13	3.343,7	62	25-feb-13	2.982,5
63	20-may-13	3.024,3	63	25-feb-13	3.165,2	63	01-feb-13	3.215,4	63	26-feb-13	2.983,7
64	12-jun-13	3.023,7	64	26-feb-13	3.168,9	64	02-feb-13	3.171,8	64	01-mar-13	2.988,1
65	13-jun-13	3.027,0	65	27-feb-13	3.180,9	65	03-feb-13	3.163,9	65	02-mar-13	3.014,2
66	14-jun-13	3.028,2	66	28-feb-13	3.171,1	66	04-feb-13	3.126,0	66	03-mar-13	2.995,4
67	15-jun-13	3.026,0	67	01-mar-13	3.168,6	67	05-feb-13	3.229,9	67	04-mar-13	2.982,1
68	16-jun-13	3.025,8	68	02-mar-13	3.167,2	68	06-feb-13	3.118,1	68	05-mar-13	2.986,0
69	17-jun-13	3.026,3	69	03-mar-13	3.158,4	69	07-feb-13	3.140,5	69	06-mar-13	2.982,7
70	27-jun-13	3.023,7	70	04-mar-13	3.151,1	70	08-feb-13	3.160,3	70	07-mar-13	2.977,5
71	30-jun-13	3.023,5	71	05-mar-13	3.229,4	71	09-feb-13	3.153,3	71	08-mar-13	2.991,0
			72	06-mar-13	3.208,5	72	10-feb-13	3.153,9	72	09-mar-13	2.984,9
			73	10-abr-13	3.115,5	73	11-feb-13	3.190,5	73	10-mar-13	3.037,8
			74	16-abr-13	3.129,7	74	12-feb-13	3.198,3	74	11-mar-13	2.987,0
			75	17-abr-13	3.151,7	75	13-feb-13	3.178,4	75	12-mar-13	2.985,5
			76	18-abr-13	3.126,9	76	14-feb-13	3.165,3	76	08-abr-13	2.958,7
			77	19-abr-13	3.146,1	77	15-feb-13	3.175,3	77	09-abr-13	2.972,7
			78	27-abr-13	3.135,1	78	16-feb-13	3.126,6	78	18-abr-13	3.033,7
			79	28-abr-13	3.128,9	79	17-feb-13	3.155,5	79	28-may-13	2.955,4
			80	29-abr-13	3.128,1	80	18-feb-13	3.150,3	80	29-may-13	2.989,9
			81	30-abr-13	3.145,9	81	19-feb-13	3.124,9	81	30-may-13	2.993,7
			82	01-may-13	3.132,9	82	20-feb-13	3.153,5	82	01-jun-13	3.007,8
			83	05-may-13	3.160,0	83	21-feb-13	3.173,4	83	02-jun-13	2.997,5
			84	06-may-13	3.158,8	84	22-feb-13	3.169,6			
			85	07-may-13	3.140,0	85	23-feb-13	3.175,2			
			86	08-may-13	3.152,0	86	24-feb-13	3.170,9			
			87	09-may-13	3.175,2	87	25-feb-13	3.170,4			
			88	10-may-13	3.172,5	88	02-mar-13	3.133,2			
			89	11-may-13	3.134,2	89	03-mar-13	3.135,0			
			90	13-may-13	3.178,5	90	04-mar-13	3.132,0			
			91	14-may-13	3.173,7	91	05-mar-13	3.142,2			
			92	15-may-13	3.185,6	92	06-mar-13	3.126,4			
			93	16-may-13	3.167,6	93	13-mar-13	3.117,1			
			94	17-may-13	3.159,8	94	14-mar-13	3.133,7			
			95	13-jun-13	3.129,9	95	15-mar-13	3.376,9			
						96	07-abr-13	3.113,5			
						97	08-abr-13	3.103,6			
						98	09-abr-13	3.105,1			
						99	10-abr-13	3.103,8			
						100	11-abr-13	3.118,9			
						101	12-abr-13	3.123,5			
						102	13-abr-13	3.109,7			
						103	14-abr-13	3.147,8			
						104	15-abr-13	3.124,1			
						105	16-abr-13	3.151,4			
						106	17-abr-13	3.138,2			
						107	18-abr-13	3.107,3			
						108	19-abr-13	3.114,5			
						109	20-abr-13	3.131,9			
						110	21-abr-13	3.136,2			
						111	22-abr-13	3.157,5			
						112	30-abr-13	3.095,9			
						113	01-may-13	3.099,5			
						114	02-may-13	3.097,4			
						115	03-may-13	3.103,1			
						116	04-may-13	3.104,6			
						117	05-may-13	3.114,7			
						118	06-may-13	3.117,8			
						119	07-may-13	3.108,3			
						120	28-jun-13	3.133,5			
						121	29-jun-13	3.133,5			
						122	30-jun-13	3.133,5			

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

A continuación se muestran los gráficos obtenidos con los resúmenes estadísticos para cada unidad de generación, así como las gráficas de series de tiempo, en las que es posible observar cuando los puntos muestrales se encuentran fuera de los límites (3 desviaciones estándar sobre y bajo la media) o situaciones tales como que ocho puntos o más están dentro de los límites de control en forma creciente o decreciente, ocho puntos o más están dentro de los límites de control pero todos sobre (o bajo) la línea central, o que los puntos forman ciclos o estructuras determinadas, todas estas situaciones demuestran que el proceso está fuera de control. Además en las gráficas de series de tiempo se destacan las causas especiales que afectan el proceso y que es necesario tener en cuenta para la etapa de análisis.

Unidad N°2.

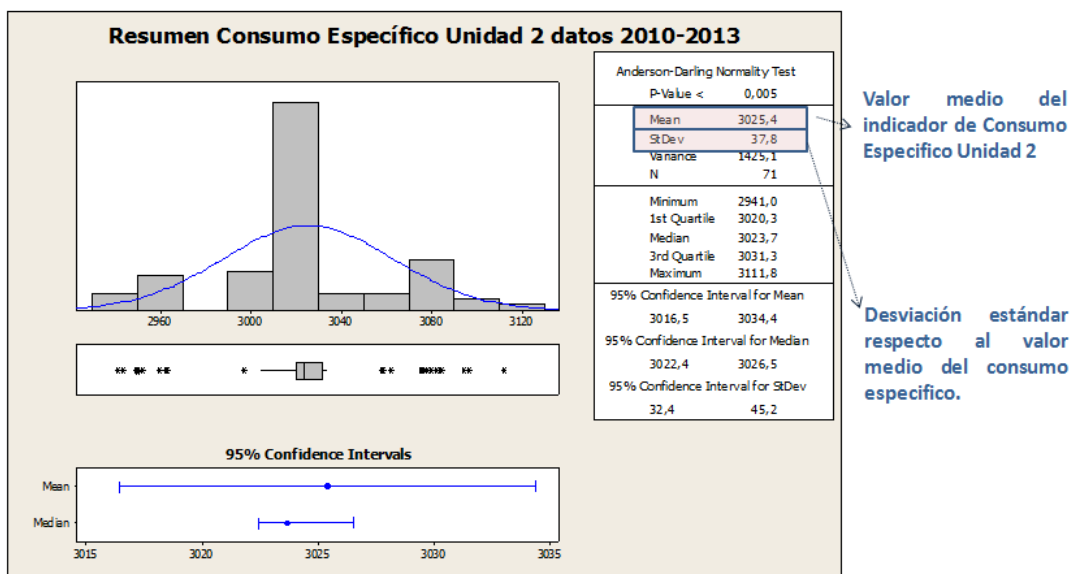


Figura N° 35. Histograma para el Consumo Específico de la Unidad N°2. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

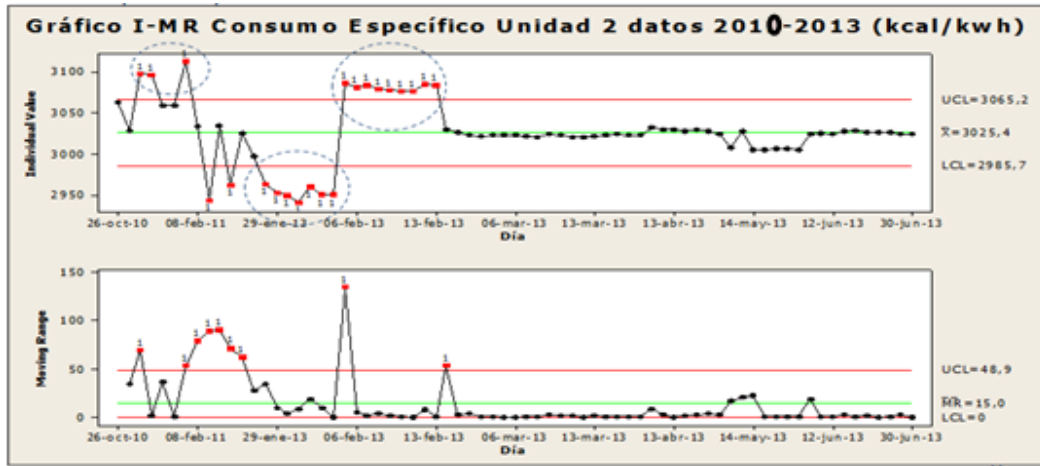


Figura N° 36. Gráfico I-MR. Para el consumo específico de la Unidad N°2. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

Unidad N°3.

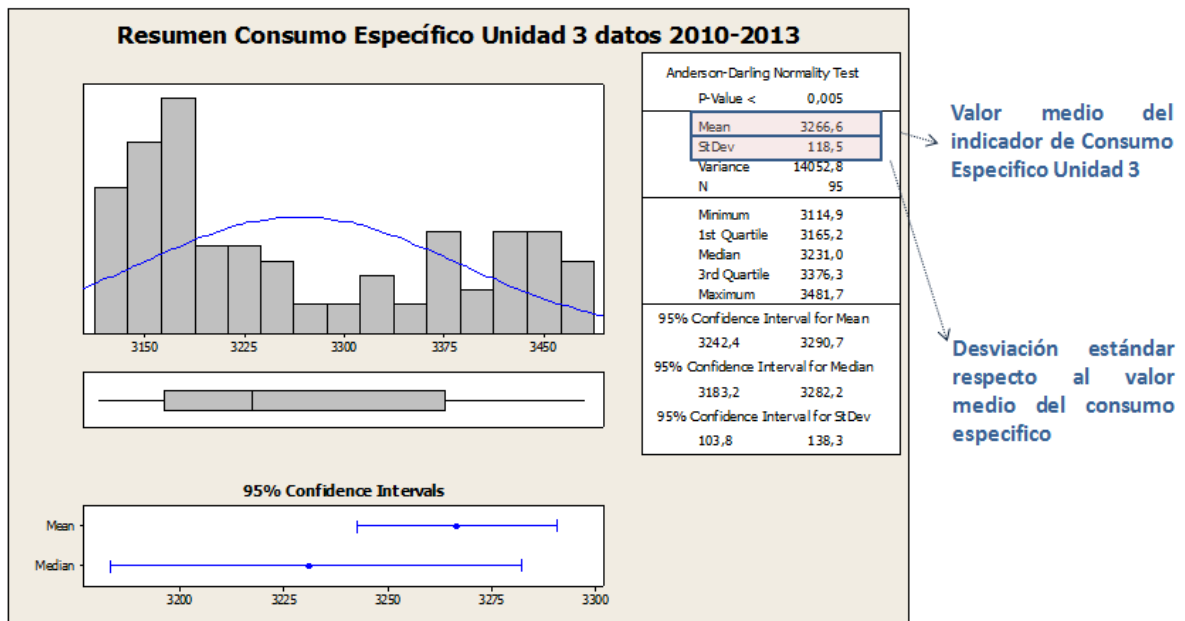


Figura N° 37. Histograma para el Consumo Específico de la Unidad N°3. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

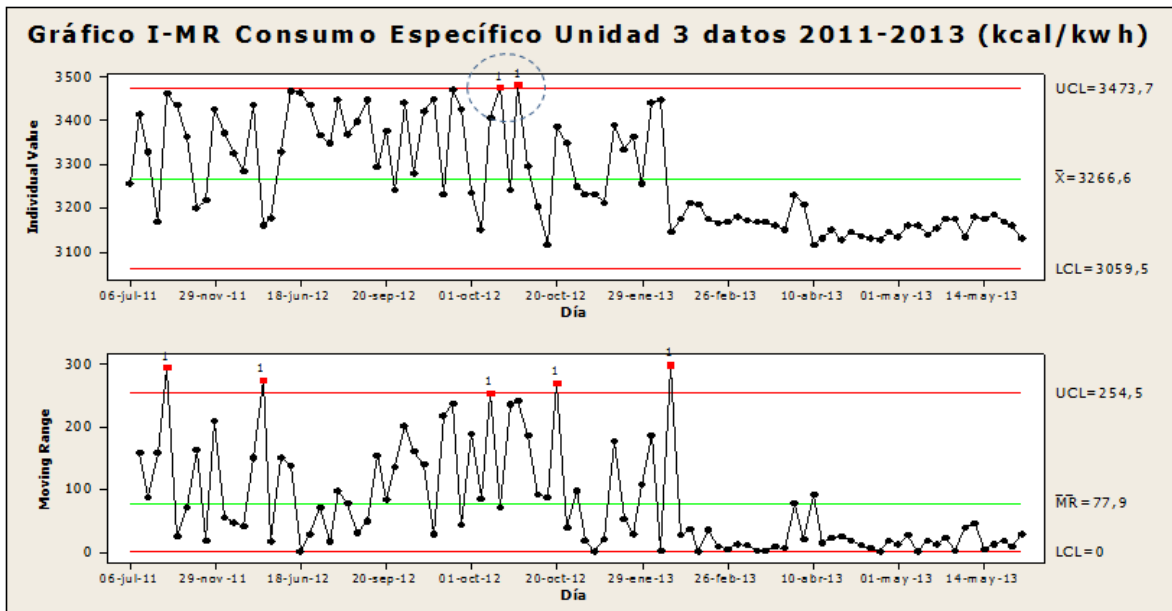


Figura N° 38. Gráfico I-MR. Para el consumo específico de la Unidad N°3. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

Unidad N°4.

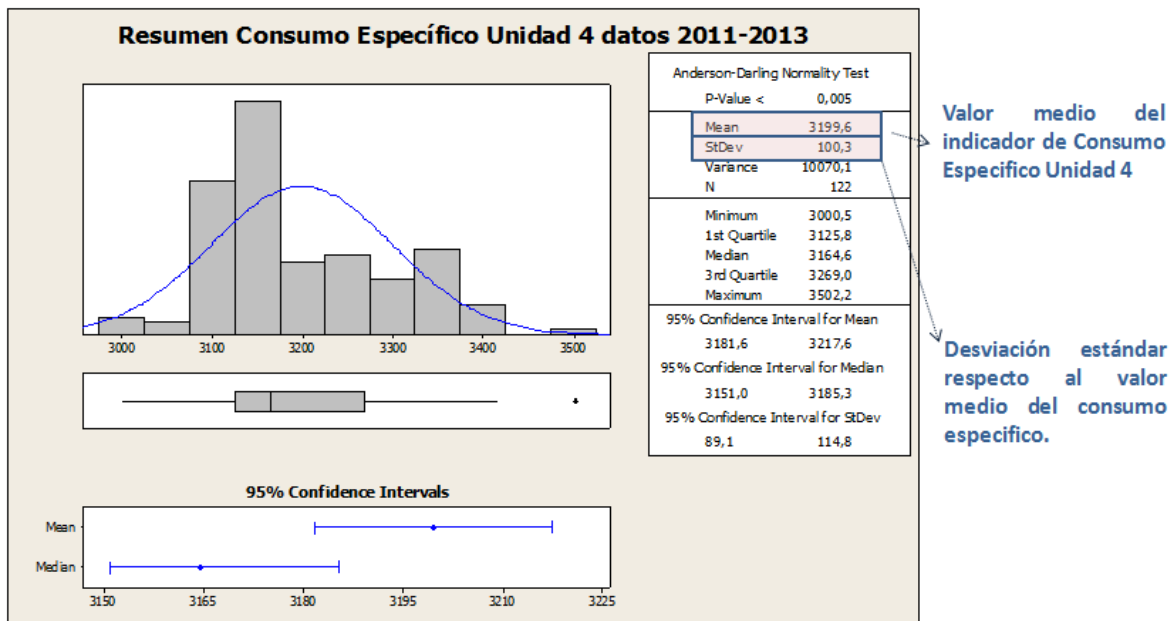


Figura N° 39. Histograma para el Consumo Específico de la Unidad N°4. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

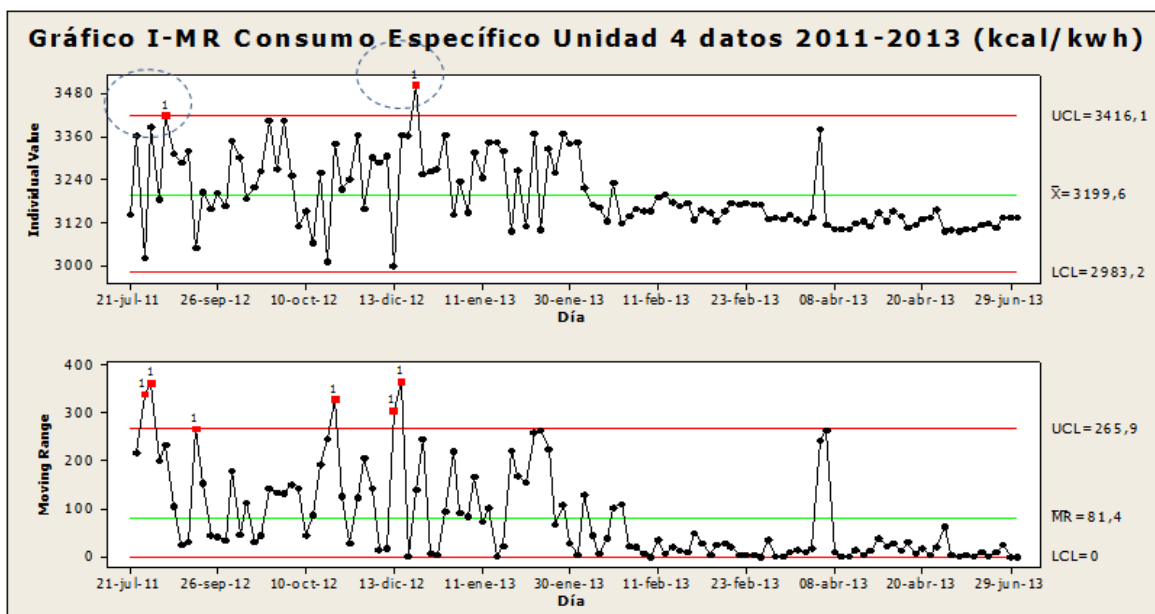


Figura N° 40. Gráfico I-MR. Para el consumo específico de la Unidad N°4. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

Unidad N°5

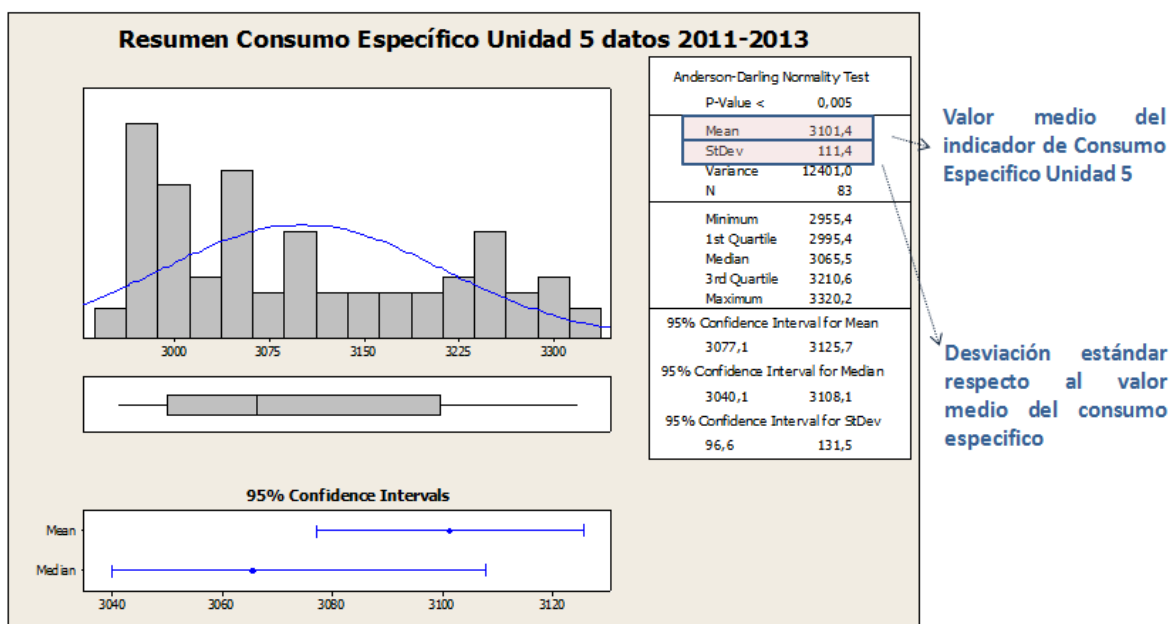


Figura N° 41. Histograma para el Consumo Específico de la Unidad N°5. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

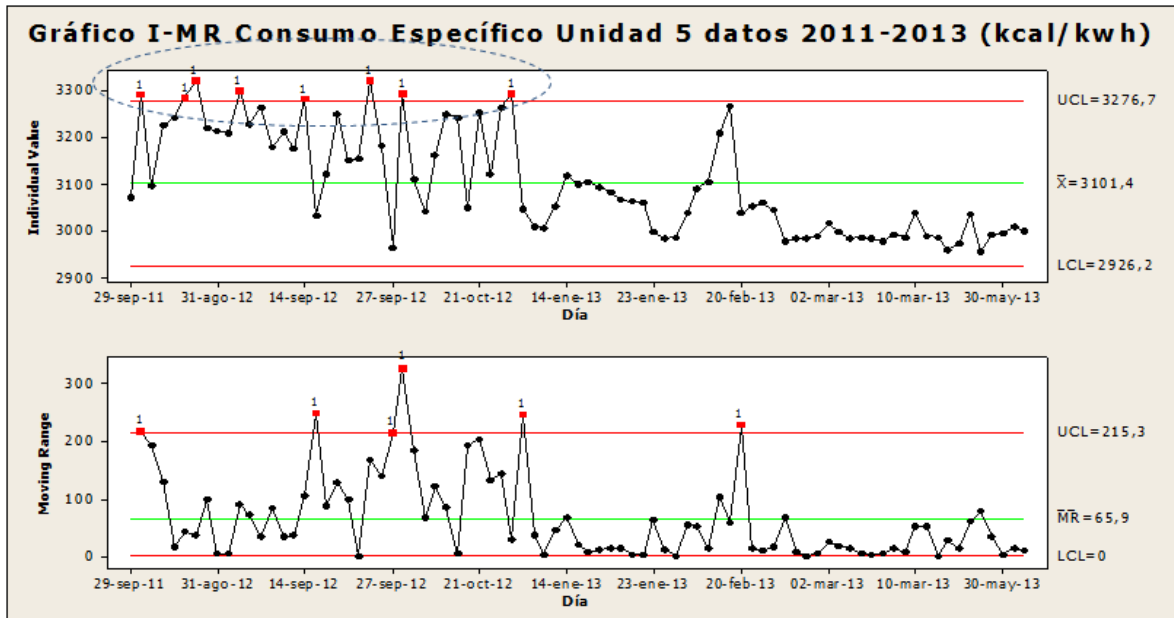


Figura N° 42. Gráfico I-MR. Para el consumo específico de la Unidad N°5. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

Con el fin de comparar el comportamiento de las distintas unidades, hemos desarrollado un diagrama de cajas de variabilidad de los consumo específico de las unidades N°2, N°3, N°4, y N°5 de la central "Ejemplo" con las poblaciones de datos de cada unidad.

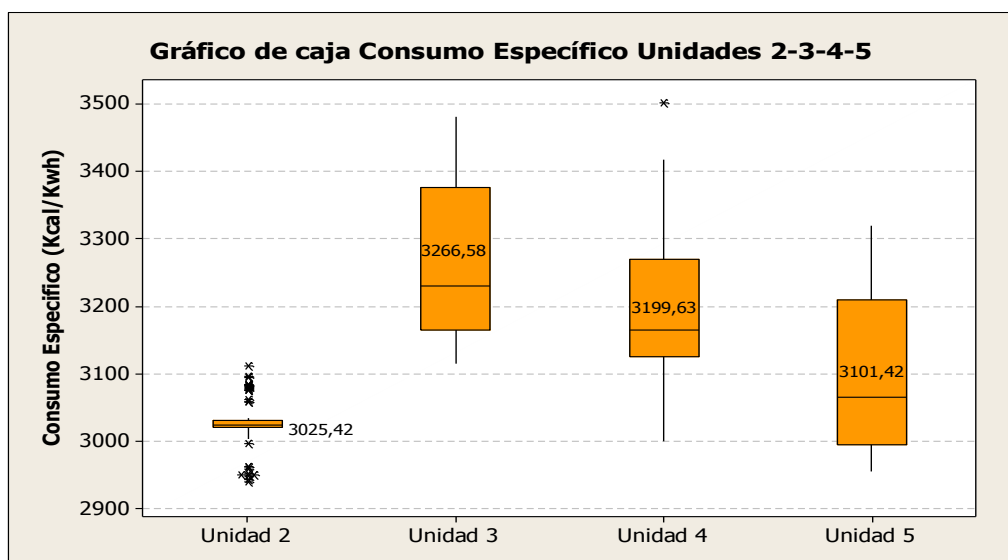


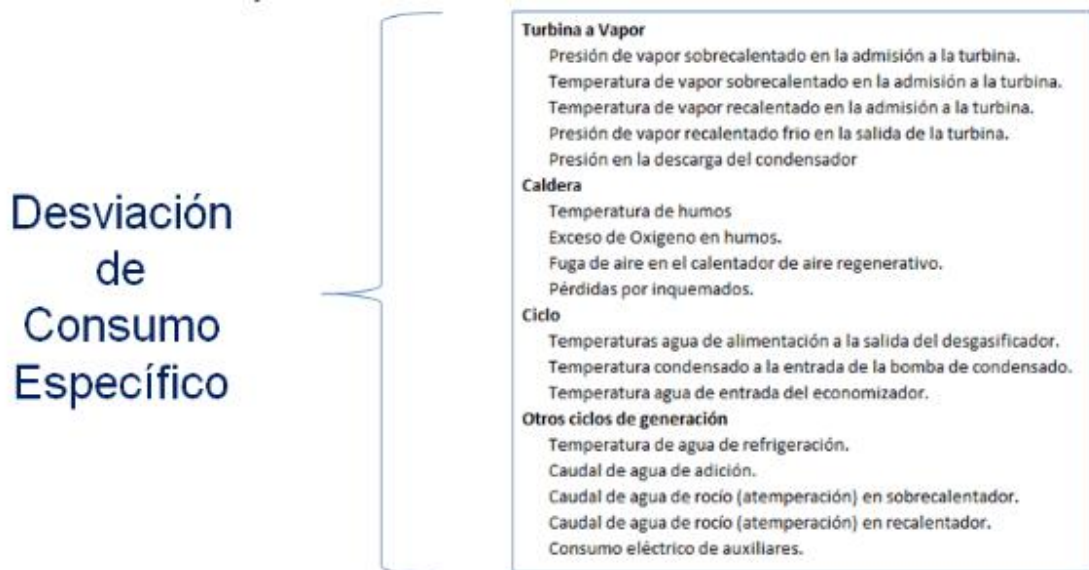
Figura N° 43. Diagrama de caja para el Consumo Específico de Unidades 2 – 3 – 4- 5 de la central “Ejemplo”. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

De la gráfica de la figura N°43 es posible apreciar que la unidad N°2 es la que posee menor variabilidad en el comportamiento del consumo específico aunque con la mayor cantidad de causas especiales que deben ser posteriormente analizadas. Aunque el diseño de las unidades de generación N°3, N°4 y N°5 es idéntico, todas están desplazadas en su centro de consumo específico y poseen una variabilidad similar en cuanto a rangos, lo cual coincide con que las unidades más nuevas o con menos uso presentan los menores consumos específicos, por lo tanto los menores consumos de combustibles para generar la misma energía.

A continuación explicaremos en qué consiste el método VACE, con el que se efectuará la valorización de las pérdidas monetarias del ciclo termodinámico para las centrales térmicas, por las pérdidas causadas por desvíos en el consumo específico respecto al valor de referencia de cada unidad declarado por cada central. Para el cálculo se miden los parámetros críticos operacionales y parámetros externos de corrección con los cuales se determina el grado de afectación de cada parámetro en la desviación del consumo, determinando así también las causas principales.

Para las centrales que cuentan con turbinas a vapor como es el caso de central “Ejemplo”, el método considera el control de los siguientes parámetros operacionales de cada unidad de generación.

Tabla N° 20. Fuente: Procedimiento interno para ejecución del método VACE, perteneciente a la empresa de Energía dueña de la Central Ejemplo.



Fuente: (Grupo Endesa, 2002)

Además deben medirse los siguientes parámetros externos a la central, los que deben ser considerados para corregir los siguientes parámetros operacionales:

- Temperatura Ambiente.
- Humedad ambiente.
- Presión Atmosférica.
- Temperatura de agua de refrigeración.

Para la medición se deben tener las siguientes consideraciones:

- Cada central debe definir los valores de referencia de cada uno de los parámetros operacionales que mide, los que deben ser obtenidos en pruebas de eficiencia, pruebas en fábrica o la experiencia en la operación de la unidad, considerando el “derrateo” propios de cada equipo según su desgaste natural no recuperable con mantenimientos.
- Cada central debe tener o construir las curvas de corrección del consumo específico respecto a cada parámetro operacional a medir.
- Cada central debe poseer y mantener calibrados los instrumentos necesarios para la medición de los parámetros requeridos, los cuales deben tener una precisión de 0,5% o inferior.
- Para efectuar la prueba de medición de los distintos parámetros que registra el método VACE, las unidades deberán encontrarse en carga estable por un periodo de tiempo no inferior a 120 min.

- e) Para la lectura de la medición de los parámetros requeridos, no debe excederse por más de 10 minutos el tiempo transcurrido entre cada lectura efectuada.
- f) La cantidad de lecturas y el tiempo entre lectura debe definirse de acuerdo al grado de automatización de la instrumentación disponible en la central.
- g) Cada central debe poseer un sistema de validación de los parámetros a medición. Las lecturas de cada parámetro deben estar dentro del rango posible de medición, referidas a las condiciones de prueba. Los parámetros que se encuentren fuera de rango deberán ser descartados y se debe proceder a verificar el estado y calibración de los instrumentos. Las variaciones de medidas de cada parámetro entre lecturas no deben exceder a los máximos permitidos. Se deben descartar las medidas cuya variación exceda a las máximas permitidas.

Tabla N° 21. Variaciones máximas permitidas en centrales térmicas.

Variaciones máximas permisibles en la condición de prueba

Las variaciones máximas entre cada lectura de los parámetros controlados durante una prueba del método VACE, bajo condición de unidad estabilizada, son las que se adjuntan en la siguiente tabla. En caso de exceder los valores se deberían descartar dichas lecturas para determinar el valor medio.

Potencia eléctrica	± 2.0 %
Presión atmosférica	± 0.5 %
Temperatura de aire en la entrada	± 2.5 °C
Presión absoluta de aire de aspiración	± 0.5 %
Temperatura de agua de refrigeración	± 2.5 °C
Temperatura de sobrecalentado	± 5.5 °C
Presión de sobrecalentado	± 1.0 %
Temperatura de recalentado	± 5.5 °C
Presión de recalentado	± 1.0 %
Temperatura de agua alimentación	± 5.5 °C
Presión absoluta condensador	± 1.0 %
Caudal de agua de reposición	± 2.0 %
Temperatura de salida de humos	± 5.5 °C
Exceso de oxígeno de humos (Orsat)	± 3.0 %
Energía en servicios auxiliares	± 5.0 %
Flujo de combustible	± 2.0 %
Poder calorífico superior (carbón)	± 0.5 %
Poder calorífico superior (gas y gasoil)	± 3.5 %

Fuente: (Grupo Endesa, 2002)

La central debe ejecutar el método VACE una vez por semana, en caso que la central se encuentre con despacho permanente o cada 100 horas de servicio, en caso que el despacho sea esporádico.

- h) Una vez realizada la prueba del método VACE, cada central debe evaluar económicamente el sobreconsumo de combustible en el periodo entre el anterior y la actual ejecución del método, de acuerdo al precio del combustible y además se debe calcular su equivalente en precio de energía medio en el mercado Spot en el mismo periodo. (Grupo Endesa, 2002)

$$\text{Perdida} = (\Delta \text{CE} * \text{KWh}_{\text{bruta periodo}} / \text{CE}_{\text{referencia}}) * (\text{CMg}_{\text{medio sistema}} - \text{CMg}_{\text{unidad}})$$

- i) La central debe tener un registro con cada prueba del método VACE ejecutada, la cual servirá de respaldo para las auditorías que se llevarán a cabo periódicamente, previo aviso a la central.
- j) Cada central debe informar mensualmente las pérdidas calculadas de cada unidad de generación.

El siguiente es el formato utilizado en la central “Ejemplo” para la prueba del método VACE.

Tabla N° 22. Registro de Planilla de control de la turbina a vapor

Método VACE (Variación del Consumo de Combustible)						
Planilla de Control y Valorización Turbina Vapor						
Identificación de la Unidad						
Central	EJEMPLO			Fecha prueba	22-may-13	
Unidad N°	5			Hora inicio prueba	7:30	
Potencia Máxima	68 MW			Hora finalización prueba	9:30	
Combustible	Carbón Bituminoso					
Factores Comunes						
Potencia	Unidad	Bruta Real	Bruta ISO	Neta Real	Neta ISO	
	MW	66.40	s/d	61.9	s/d	
Factores Externos						
	Unidad	Valor Real	Valor referencia	% Desvío CE	Merma en Potencia (MW)	% Merma Potencia
Temperatura aire de aspiración	°C	15	20	-0.0350	-0.0030	-0.84
Humedad ambiental	%	69	80	-0.0068	-0.0006	-0.16
Presión Barométrica	mmHg	565	564	-0.0013	-0.0014	-0.33
Temperatura agua de refrigeración	°C	18.00	15	0.0000	0.0000	0.00
Factores Internos						
Turbina Vapor						
	Unidad	Valor Real	Valor referencia	% Desvío CE	Merma en Potencia MW	% Merma Potencia
Presión de vapor sobrecalentado en alta presión	kg/cm²	87.60	87.8	-0.0330	0.0028	0.80
Temperatura de sobrecalentado en alta presión	°C	505.80	518	-0.2100	-0.0179	-5.06
Presión de recalentado en presión intermedia	bar					
Temperatura de recalentado a presión intermedia	°C					
Presión condensador	mmHg	50.00	50.80	-0.1700	0.0029	0.24
Caldera						
Temperatura de humos (salida calentador de aire, no corregida)	°C	145.20	154	-0.1097	0.0097	2.64
Exceso de Oxígeno en humos	%	3.90	3.50	0.1218	0.0104	2.94
Fuga de aire en el calentador de aire regenerativo	%					
Pérdidas por quemados		17.90	12	3.3760	0.2870	81.38
Ciclo						
Temperatura a la salida del calentador de baja presión R2	°C	122.00	121.5	-0.0350	-0.0030	-0.84
Temperatura a la salida del calentador de alta presión R5	°C	215.00	215.3	-0.0237	0.0020	0.57
Otros Ciclo de Generación						
Temperatura agua de refrigeración (Si posee torres de enfriamiento)	°C				0.0000	0.00
Caudal de agua de adición	l/h	4.70	4	0.2140	0.0182	5.16
Caudal de agua de rocío (atemperación) en sobrecalentador	l/h	11.3	7	0.6400	0.0034	0.96
Caudal de agua de rocío (atemperación) en recalentador	l/h				0.0000	0.00
Consumo eléctrico de auxiliares	MW	4.5	6	-0.0833	0.0075	2.13
Total Desvío						
				4.11	0.353	
Consumos específicos						
	Unidad	NETO	BRUTO			
Referencia (u operacional)	kcal / kWh	2.881.3	2.886.0			
Obtenible (factores externos)	kcal / kWh	2.880.1	2885			
Efectivo (factores internos y externos)	kcal / kWh	2.999.6	2.796.3			
Otros Datos						
Fecha Prueba Anterior		22-may-13				
PCS combustible	kcal/kg	5.735.8				
PCI combustible	kcal/kg	5.632.4				
Valor del combustible	USD/kcal	7.2213E-08				
Costo Marginal declarado de la unidad	USD/MWh	141.81				
Costo Marginal del Sistema (Medio en el periodo entre pruebas)	USD/MWh	141.81				
Valorización de los desvíos						
Energía Generada Neta día	MWh	1.620.69				
Desvío del consumo específico	kcal/kWh	113.29				
Valor combustible por unidad de energía	USD / kcal	1.1564E-05				
Pérdida acumulada por valor de combustible	USD	1.312				
Pérdida acumulada por valor de energía	USD	8.0				
Potencia limitada periodo	MW	8				
Horas con limitación en periodo de control de potencia	Hrs	8				
Valor pago potencia	USD/MW	8				
Pérdida acumulada por pago de potencia	USD	8				
Observaciones y Recomendaciones:						
s/m: sin medición, s/d: sin dato, n/a: no aplica						
Nombre, Cargo y Firma del Responsable: _____						

Fuente: (Grupo Endesa, 2002) (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

En la siguiente tabla se muestran las pérdidas mensuales informadas por la central “Ejemplo” y las causas asociadas para cada unidad de generación (excepto la unidad N°2 la cual por su baja potencia instalada no es monitoreada), en el período comprendido entre Enero y Julio de 2013:

Tabla N° 23. Tabulación de las pérdidas informadas para las unidades de la central “Ejemplo”.

Causa	2013 (enero-julio)			Total Ejemplo US\$	% de Aporte	% Acumulado
	U3	U4	U5			
	US\$	US\$	US\$			
Pérdidas por inquemados	250.476	379.717	217.053	847.246	78,67%	79%
Presión condensador	35.463	18.786	11.716	65.965	6,13%	85%
Temperatura a la salida del calentador de baja presión R2	30.070	34.947	882	65.900	6,12%	91%
Temperatura de sobrecalentado en alta presión	37.293	121	5.762	43.175	4,01%	95%
Temperatura a la salida del calentador de alta presión R5	14.941	16.149	11.079	42.169	3,92%	99%
Caudal de agua de adición	-	-	5.370	5.370	0,50%	99%
Exceso de Oxígeno en humos	-	-	3.953	3.953	0,37%	100%
Presión de vapor sobrecalentado en alta presión	-	1.087	642	1.729	0,16%	100%
Temperatura de humos (salida calentador de aire, no corregida)	-	-	1.453	1.453	0,13%	100%
Consumo eléctrico de auxiliares	-	-	-	-	0,00%	100%
Caudal de agua de rocío (atemperación) en sobrecalentador	-	-	-	-	0,00%	100%
Presión de recalentado en presión intermedia	-	-	-	-	0,00%	100%
Temperatura de recalentado a presión intermedia	-	-	-	-	0,00%	100%
Fuga de aire en el calentador de aire regenerativo	-	-	-	-	0,00%	100%
Temperatura agua de refrigeración (Si posee torres de enfriamiento)	-	-	-	-	0,00%	100%
Caudal de agua de rocío (atemperación) en recalentador	-	-	-	-	0,00%	100%
Total Termozipa	368.244	450.807	257.910	1.076.961		

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

De la tabla anterior es posible construir el siguiente Diagrama de Pareto para determinar las causas que son los pocos vitales en las pérdidas cuantificadas en la central “Ejemplo”.

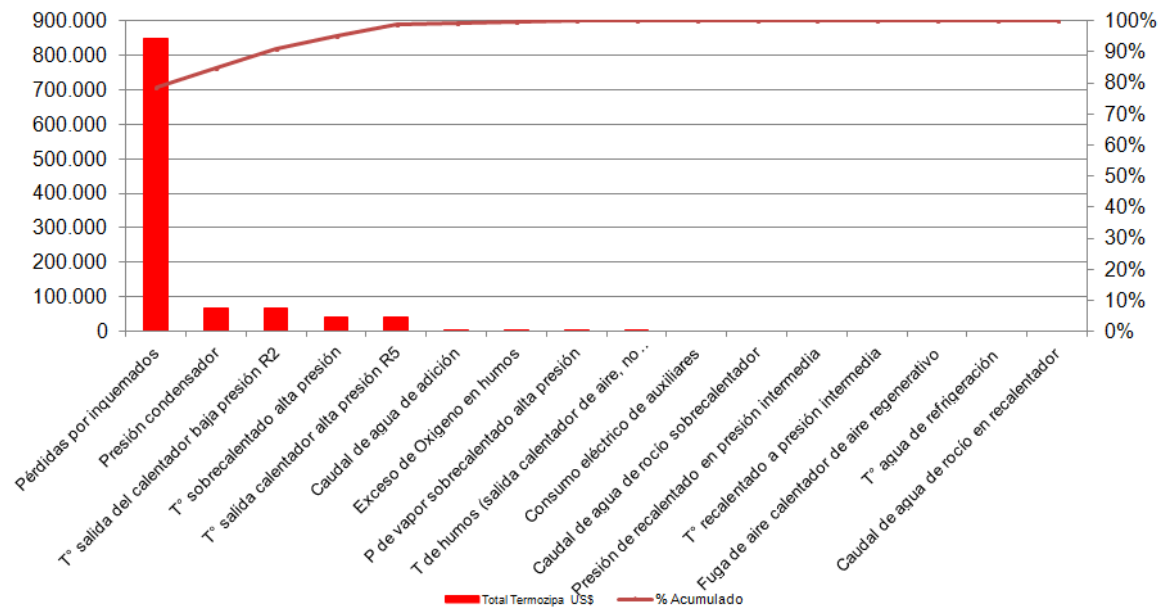


Figura N° 44. Diagrama de Pareto producto del análisis de pocos vitales de causas de variación del consumo específico de la central “Ejemplo”. Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

5.4.5 Definición de meta a alcanzar para mejorar la eficiencia en el consumo de carbón en cada una de las unidades de generación.

Para determinar la meta a alcanzar compararemos los resultados obtenidos respecto al valor referencial de consumo específico que debiera obtenerse a plena carga según la línea base de consumo específico, que es obtenida durante todos los años luego de la prueba de generación exigida por el ente regulador, la que se realiza con el propósito de poder obtener la potencia neta real de generación de cada unidad y la eficiencia en el consumo de combustible, lo anterior tiene el propósito de determinar el reconocimiento por potencia instalada o cargo por confiabilidad de parte del regulador.

Para obtener las curvas de consumo o línea base, generalmente se solicita y programa la prueba de generación posterior al mantenimiento mayor anual que se realiza a cada unidad con el propósito de obtener el mejor resultado posible, por lo tanto el valor de consumo que se obtiene a plena carga luego de efectuar la prueba será el mejor resultado a alcanzar por cada máquina, en la condición actual del proceso.

Las curvas de consumo específico actualizadas a mayo de 2013 correspondientes a las últimas pruebas oficiales de generación efectuadas en el transcurso del segundo semestre del año 2012 para las distintas unidades de generación son las siguientes:

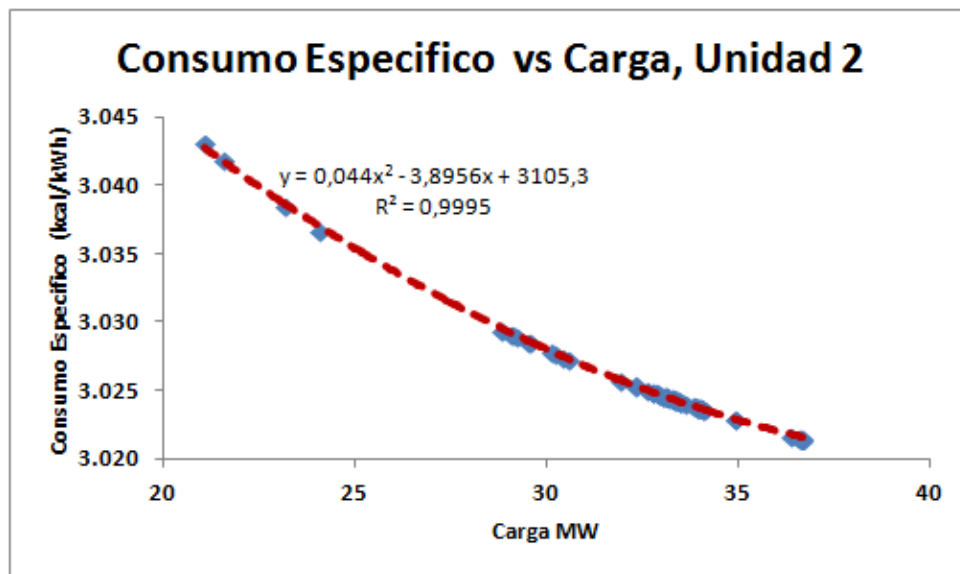


Figura N° 45. Curva de consumo de la unidad N°2 de la central “Ejemplo” (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

De la gráfica anterior el consumo a plena carga (34 MW) declarado para la unidad N°2 es de 3.024 Kcal/kWh.

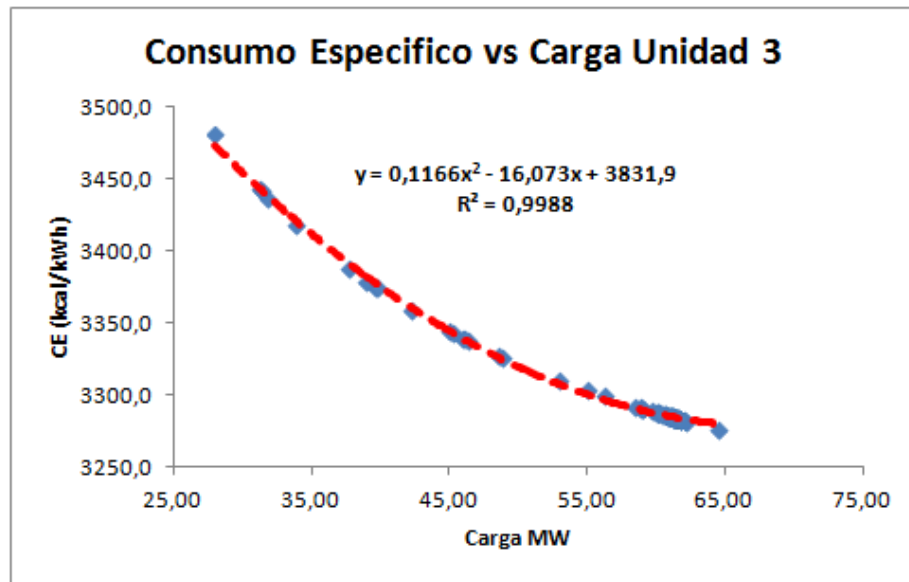


Figura N° 46. Curva de consumo de la unidad N°3 de la central “Ejemplo”. (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

De la gráfica anterior el consumo a plena carga (63 MW) declarado para la unidad N°3 es de 3.282 kcal/kWh.

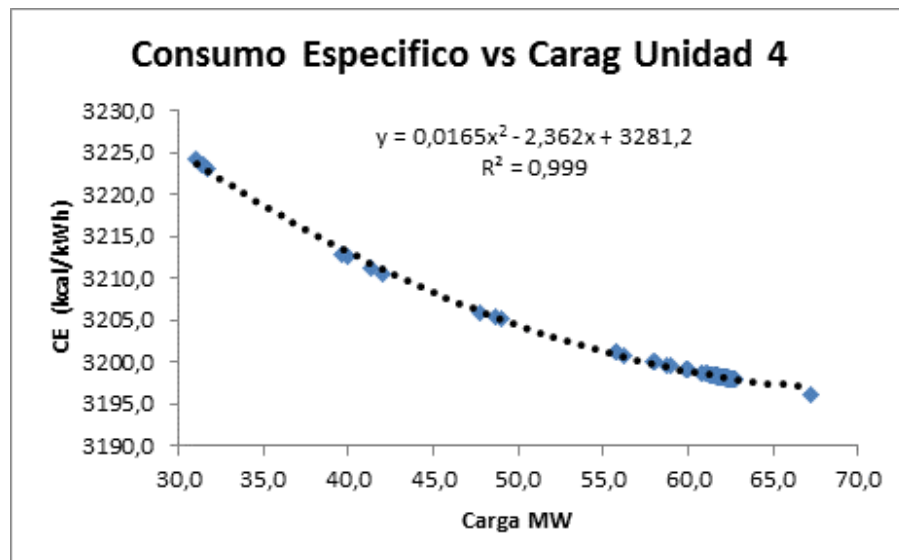


Figura N° 47. Curva de consumo de la unidad N°4 de la central “Ejemplo”. (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

De la gráfica anterior, el consumo a plena carga (64 MW) declarado para la unidad N°4 es de 3.198 Kcal/kWh.

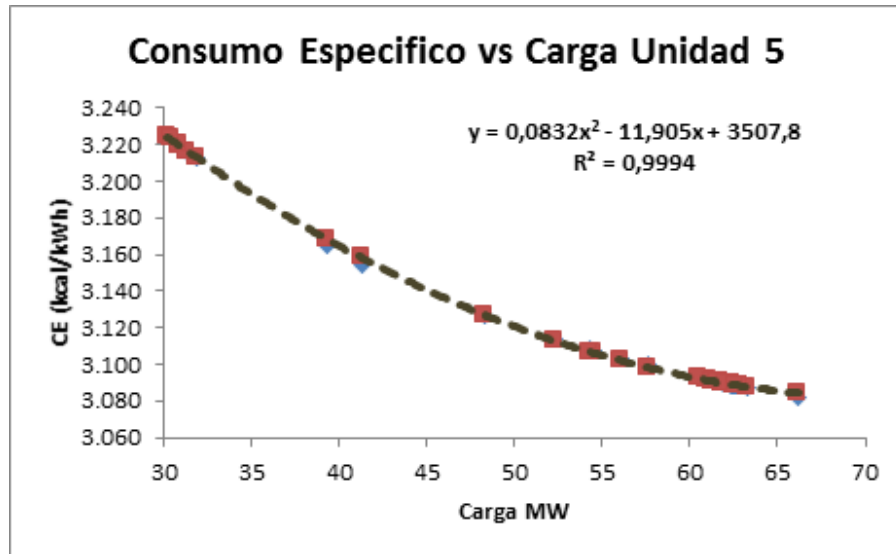


Figura N° 48. Curva de consumo de la Unidad N°5 de la central “Ejemplo”. (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

De la gráfica anterior el consumo a plena carga (64 MW) declarado para la unidad N°5 es de 3.087 kcal/kWh

Si efectuamos la comparación de los valores medios de las muestras de datos de consumos específicos obtenidas para cada una de las unidades de generación entre los años 2010, con el objetivo de alcanzar a plena carga según curvas actualizadas de generación 2013, podremos observar que los valores históricos son muy cercanos al valor objetivo, según lo que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla N° 24. Comparación de los consumos específicos de las Unidades de la central “Ejemplo”.

Unidad	Valor Medio Consumo Especifico a plena carga. Datos 2010-2013	Objetivo a plena carga según valor de referencia	Diferencia
2	3.025	3.024	0,03%
3	3.267	3.282	0,46%
4	3.200	3.198	0,06%
5	3.101	3.087	0,45%

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

De este modo el objetivo no estará enfocado en reducir el valor objetivo del Consumo Especifico ya que este valor es el que se consigue cuando las unidades se encuentran generando en las mejoras condiciones de operación actuales del proceso, lo que coincide prácticamente con el valor medio obtenido de los datos históricos, es decir el proceso está centrado. La reducción del objetivo a plena carga significaría muy probablemente transformaciones importantes en el proceso, tales como inversiones para recuperar componentes importantes del sistema y acercar el consumo a los valores de diseño, situación que será analizada en la etapas de medición y análisis, para poner en antecedentes a la dirección de la empresa generadora respecto a los esfuerzos de inversión o gasto que podrían tener impactos significativos en los beneficios económicos.

Se observa que los resultados históricos de los datos recopilados de consumo específico de las distintas unidades, es posible evidenciar que hay alta variabilidad en los resultados, ya que en la gráficas de series de tiempo tipo I-MR se observan varias causas especiales que escapan a las $\pm 3\sigma$ sobre y bajo el valor medio. La variabilidad del proceso puede estar asociada a causas relacionadas con el control operacional de los distintos factores principales que afectan el consumo específico, por lo que nuestro objetivo estará puesto en reducir la variabilidad del proceso, enfocándonos en reducir las pérdidas más significativas (pocos vitales) extraídas del método VACE y de los análisis a realizar en la etapa medir.

Como veremos en la etapa medir, actualmente en la compañía no existen rangos de especificación para la variabilidad del Consumo Especifico, sin encontrar una razón justificada para esto, lo cual podría tener su origen en la preocupación principal de temas estratégicos no relacionados con la eficiencia en los procesos productivos, tales como los índices de disponibilidad y confiabilidad lo cual se enmarca en la gestión de activos de generación.

Por lo expuesto en este punto, se estima que podremos reducir la variabilidad básicamente con medidas que apunten a un mejor control de la operación, nuestro objetivo será la reducción de la variabilidad del consumo específico en una desviación estándar sobre y bajo el valor de referencia es decir aceptando que el proceso actual para cada una de las unidades está en un nivel de 2 sigma, con un 30,8 % de porcentaje los datos fuera de rangos de aceptación o 308.000 defectos por millón de oportunidades, según lo muestra la siguiente tabla y llevándolo a un nivel 3 sigma con un 6,68% de porcentaje de datos fuera de rangos de aceptación.

Tabla N° 25. Tabulación en términos de calidad Seis Sigma.

Nivel de calidad	DPMO	Nivel Sigma
31,7%	682.600	1,0
69,2%	308.000	2,0
93,3%	66.800	3,0
99,4%	6.210	4,0
99,98%	320	5,0
99,9997	3,4	6,0

Fuente: (Molteni Raúl, 2008)

Por otro lado se ha decidido agregar el objetivo de disminuir también en 0,5% el valor de referencia según las últimas pruebas de “Heat Rate” de cada unidad, efectuadas el 2012.

5.4.6 Evaluación del impacto financiero para la mejora de eficiencia en el consumo de en cada una de las unidades de generación.

Considerando que no es posible trasladar directamente el porcentaje de reducción de la variación del consumo específico propuesto como meta (reducir un 30,8% los resultados de mediciones fuera de especificación), como el mismo porcentaje de reducción de pérdidas monetarias que se calculan con el método VACE, haremos un cálculo conservador de un beneficio alcanzable.

Debido a que en la Figura N° 32 se muestra que en el resultado de las pruebas de mezclas de carbones para reducir el Costo Variable de Combustible efectuadas en la unidad N°5, se reduce considerablemente el porcentaje de inquemados, el cual es la principal causa de pérdidas monetarias calculadas por el método VACE, asumiremos en esta etapa que la reducción de inquemados no será producto de la implementación del plan de control que aborde esta iniciativa de mejora de eficiencia en el consumo de carbón ya que posiblemente el beneficio este asociado al uso de mezclas. De lo anterior asumiremos que podemos ser capaces de reducir el 40% de las pérdidas monetarias calculadas por el método VACE cuyas causas sean distintas a los inquemados, lo anterior enfocándonos en dos ejes importantes:

- Mejorar los procedimientos y controles (estandarización) de las actividades que ejecuta el personal del Área de Operaciones en el proceso de combustión del carbón, tales como limpieza del condensador, apertura de clasificadora de carbón, recambio de bolas de los molinos, etc, que tal como mencionamos anteriormente, corresponden a actividades ejecutadas por operadores, lo cual es un factor importante a considerar en la variabilidad del proceso de combustión en Central “Ejemplo”, debido a la baja automatización de sus procesos.
- Reinvertir en los activos del proceso de generación de vapor que actualmente se encuentran dañados (Intercambiadores de calor, válvulas con pérdidas de hermeticidad, etc). Los montos de inversión serán considerados en la evaluación económica.

De las pérdidas monetarias que se muestran en la Tabla N°23, se extrae que las pérdidas por causas distintas a inquemados, suman un valor de 229.715 USD para el periodo comprendido entre Enero a Julio de 2013. El promedio mensual de perdidas sería de $229.715/7 = 32.816$ USD/Mes, por tanto el promedio anual sería de $32.816 \times 12 = 393.797$ USD/Año, si disminuimos un 40% las perdidas, el ahorro sería de $393.797 \times 0,4 = 157.519$ USD/Año

El potencial beneficio de esta iniciativa es de 157.519 USD/Año

Otros beneficios no cuantificados en esta etapa:

- Mayor margen variable por disminución de costo variable unitario del combustible relacionado con un menor consumo de combustible para generar un MWh, o por mayor venta de energía, por mayores despachos producto de informar un menor precio de oferta, relacionado en un menor costo de generación por menor costo variable unitario del combustible al reducir el consumo específico de las unidades.

Posibles costos no cuantificados en esta etapa:

- Recuperación de equipos para recuperar eficiencia en el consumo (Ej: Válvulas en mal estado, reemplazo de cuerpos molidores para mejorar la molienda, automatización de la instrumentación, etc.)

5.5 Definición de Proyecto de Mejora de Proceso.

A continuación se muestra el “Project Charter” que se propone para los responsables del Proceso.

Título del proyecto: Reducción del costo variable de combustible mejorando la eficiencia en el consumo de carbón en una central eléctrica convencional “Ejemplo”

Oportunidades:

- > Ahorros por reducción del costo variable del combustible. Actuando en dos ejes: Utilización de mezclas de Carbón y Reducción de pérdidas en el proceso de generación .
- > Mayores ingresos por mayor venta de energía.

Impacto en el negocio:

Potenciales Beneficios Económicos. Término de etapa definición.	
Objetivo	US\$/Año
Y1: Reducción del CVC con la utilización de mezclas de carbones.	978.122
Y2: Reducir el CVC aumentando la eficiencia en el consumo de carbón en el proceso de generación.	157.519
	1.135.641

Alcance del proyecto:

Proceso de Operación Centros de Producción, Subproceso de Gestión de Combustibles, etapas de:

- > Provisión del carbón.
- > Recepción y acopio del carbón en la central.
- > Control de calidad.
- > Consumo del Carbón para el proceso de generación.

Contribución del equipo:

- > Definir el “Cómo” cumplir los objetivos:
 - Transformación de procedimientos operativos para la utilización de Mezclas.
 - Optimización del proceso de recepción, acopio y utilización de carbón (LEAN) para adecuarse al modelo de mezclas y reducir de pérdidas en el procesos de generación

Iniciativas a abordar:

- > Y1: Reducción del costo variable unitario del combustible, utilizando mezclas de carbón.
Indicador Precio de Inventario [Cop/ton].
- > Y2: Mejora de la eficiencia en el consumo de combustible de las unidades de generación.
Indicador: Consumo Especifico de cada unidad [kcal/kWh]

Equipo de trabajo:

- > Sponsors del proyecto: C.L (Gerente General Generación País)
- > Dueños del Proceso: E.S (Jefe Central Ejemplo) – J.M. (Jefe División Gestión de Combustibles).
- > Black Belt: Pedro Vergara.
- > Equipo de trabajo: Pedro Vergara, Johnny Pieringer (Black Belt), A.M (Analista de Resultados Tecnología Térmica-Colombia), N.S (Especialista Comercial División Gestión de Combustible encargado de los Contratos de Carbón-Colombia), N.G (División Mejora Continua – Colombia), S.R (Producción Eléctrica Regional)
- > Equipo de apoyo: R. B (Especialista Planificación y Control. Controller)

Objetivos:

- > Y1: Disminuir en un 10,41% el costo variable unitario mensual del carbón de inventario durante el año 2014, utilizando mezclas de carbón.
- > Y2: Disminuir rango de la variabilidad del Consumo Especifico en dos desviaciones estándar respecto al rango actual, manteniendo el valor medio como el valor de referencia de cada unidad. (mantener centramiento)

Plan: Cronograma de trabajo considera la metodología DMAIC:

	may 13		jun 13		jul 13		ago 13		sep 13		oct 13		nov 13		dic 13	
Etapa	01	02	03	04	01	02	03	04	01	02	03	04	01	02	03	04
Definir																
Medir																
Analizar																
Mejorar																
Controlar																

Figura N° 49. Project Charter asociado al proyecto de mejora. (Elaboración propia, 2014)

6 Desarrollo del trabajo – Etapa Medir

6.1 Levantamiento del mapa del proceso.

6.1.1 Descripción de las etapas del proceso Gestión del Combustible.

Provisión del Carbón.

Con el fin de cumplir los objetivos del proceso y considerando las especificaciones técnicas determinadas por la empresa generadora dado que ha firmado contratos a 5 años con 22 proveedores de las regiones de Cundinamarca y Boyacá (provincias de Colombia aledañas a la ubicación geográfica de la central “Ejemplo”). Cada proveedor tiene una cuota de entrega establecida la que debe ser entregada a la central mensualmente. Para cumplir con ello, cada proveedor traslada diariamente el carbón desde el origen de la extracción hasta la central “Ejemplo”, por medio de camiones que son subcontratados por los mismos proveedores.

Para ingresar a la central los camiones deben pasar por una control de ingreso el que revisa los documentos y elementos de protección personal del conductor, además se efectúa una revisión del estado del vehículo, controles que son realizados por la empresa de vigilancia y seguridad en el acceso de la central, que es también el acceso y salida del personal, junto con otros vehículos de la compañía.

Luego de acceder a la central “Ejemplo” a través de los caminos internos que son de uso común los camiones se dirigen a la báscula, la que es operada por personal de una empresa contratista, quienes reciben la “remisión” o recibo y registran en una planilla electrónica (planilla Excel) los datos del camión, el peso de ingreso, la fecha y hora.

Posteriormente los camiones se dirigen hacia el patio de acopio de carbón donde descargan el material en la pila que les ha sido asignada de acuerdo a las características propias del mineral que aportan. Una vez finalizada la descarga en la pila correspondiente el producto es analizado por personal de vigilancia utilizando un instrumento que mide el porcentaje de ceniza presente en el carbón, efectuando una validación rápida de aceptación de la entrega, siempre y cuando el mineral no supere el máximo rango permitido (15%). Adicionalmente junto con analizar el mineral entregado por cada camión, el personal de vigilancia toma una muestra de carbón el que es depositado en el interior de un saco junto con una ficha que indica el número de la muestra.

Concluida la toma de muestra y efectuada la validación de porcentaje de ceniza dentro de un valor aceptable los camiones se retiran del patio y se dirigen nuevamente a la báscula, donde se completa la planilla electrónica (planilla Excel) donde se registra el peso del camión vacío, la hora y los datos de la muestra.

Finalmente el camión se dirige al acceso donde nuevamente es revisado por personal de vigilancia para posteriormente retirarse del recinto.

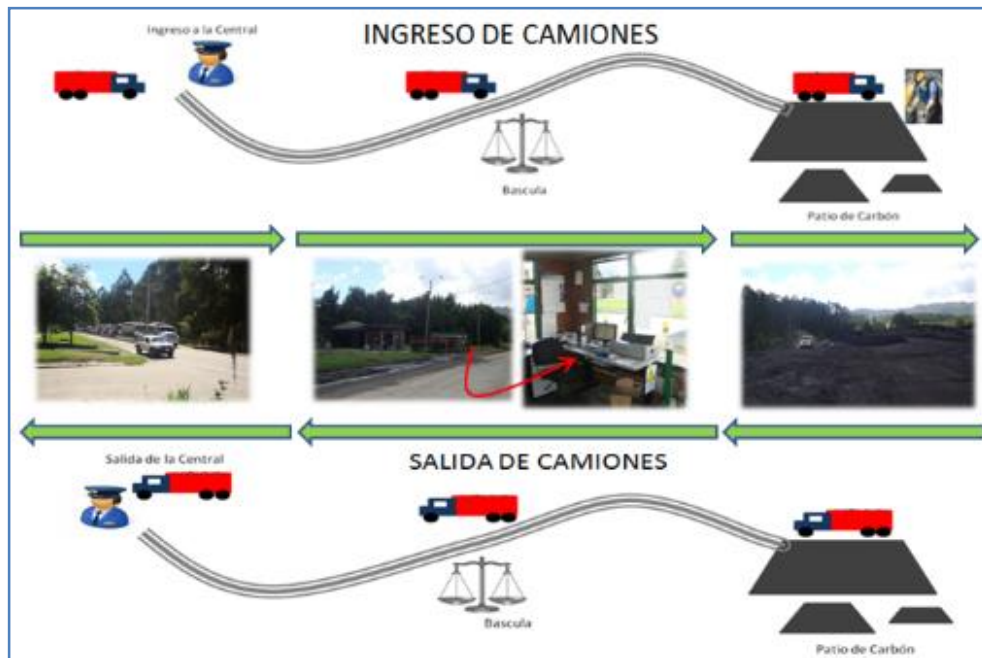


Figura N° 49. Esquema gráfico de la provisión del carbón para la central “Ejemplo”.
(Elaboración propia, 2014)

Recepción y Acopio del Carbón.

Esta etapa tiene por objeto lograr un acopio eficiente y seguro del carbón para abastecer de combustible a cada unidad de generación de la central en el tiempo y calidad requerido para su operación.

Para el acopio del carbón actualmente se cuenta con un patio de almacenamiento con 2 pilas, las cuales concentran las descargas de cada camión que ingresa a la central de acuerdo al porcentaje de ceniza del mineral que aporta cada proveedor. De esta forma cada proveedor tiene asignada su pila, la que tiene un rango definido por el porcentaje de ceniza aceptado.

Las distintas actividades de este subproceso constan en el acopio y compactación de las pilas, con el propósito de resguardar la seguridad para permitir el tránsito de camiones y maquinaria, para ello no se debe sobrepasar altura y taludes de pilas para lograr el aplanamiento de superficie de tránsito. Además se debe evitar altas temperaturas por emisiones de gases combustibles en la pila para evitar la degradación del mineral por efectos del medio ambiente, fundamentalmente por efectos de la lluvia.

Por otro lado, otra actividad importante corresponde a la descarga de camiones, actualmente esta tarea no consta de un sistema de descarga motorizada en cada pila de carbón y la alimentación de material a las tolvas. Según instrucciones del personal de la central “Ejemplo”, esta tarea debe efectuarse manualmente por el mismo personal a cargo del proceso y debe seleccionar de la pila adecuada en el momento justo y en la cantidad necesaria el

mineral que requiere el Área de Operaciones. Para esto último, se utilizan máquinas para arrastrar el carbón desde las pilas hasta las tolvas que alimentan la banda transportadora la que lleva el mineral hasta cada unidad de generación luego de efectuar una primera trituration en el trayecto.

Todas las actividades antes mencionadas son ejecutadas por empresas contratistas.

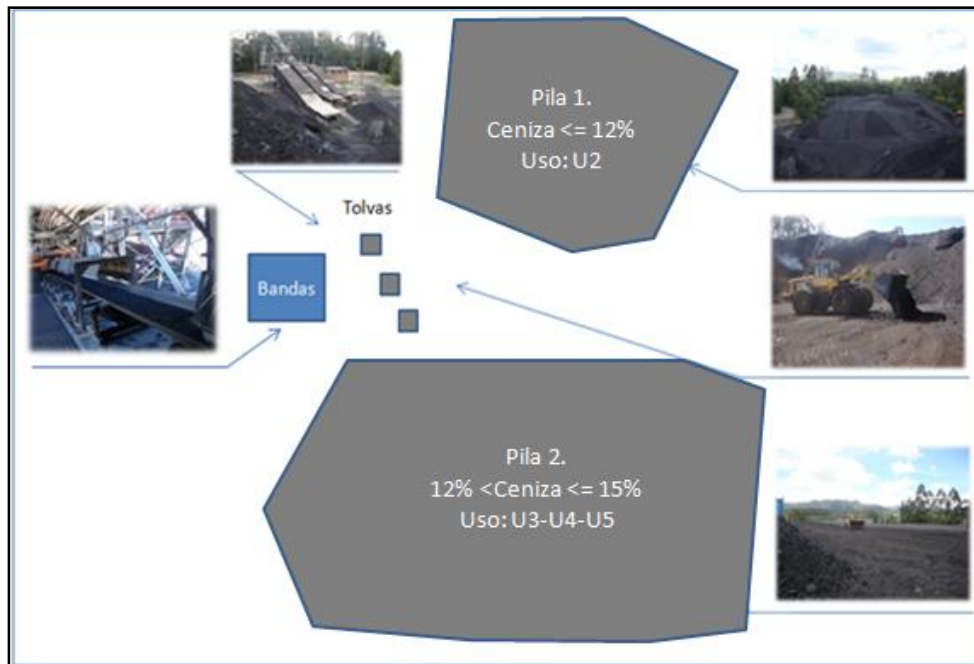


Figura N° 50. Esquema de recepción y acopio del carbón en la central “Ejemplo”.
(Elaboración propia, 2014)

Control de Calidad del Carbón.

Esta etapa comprende las siguientes actividades de tomas de muestras, disposición y resguardo de las muestras, preparación de muestras para análisis de laboratorio, análisis de calidad y pago a proveedores.

Esta etapa tiene como objetivo efectuar el control de la calidad tanto del carbón suministrado por cada uno de los proveedores, como el que se encuentra almacenado en las pilas del patio el que es ingresado a las tolvas de cada unidad de generación. Los resultados de los análisis son entregados al Área de Operaciones de la central “Ejemplo” para ejecutar el cálculo de consumo específico y de emisiones medio ambientales, además se envían resultados de los análisis a la División Combustible de la empresa generadora para calcular el pago final a los proveedores de acuerdo a las cláusulas contractuales vigentes (Rebaja o bono en el pago debido al grado de cumplimiento de calidades contratadas y/o por cumplimiento de cuotas mensuales estipuladas).

Estas actividades son ejecutadas por empresas contratistas.

Mapa de proceso.

Con el fin de documentar gráficamente todas las actividades del proceso, hemos ordenado todas las actividades con el fin de elaborar el mapa de proceso, que tiene por objeto describir de forma detallada lo que ocurre en un proceso de manera regular y revela información nueva identificando la verdadera naturaleza del desperdicio, ya que refleja todos los pasos del línea de trabajo tales como correos electrónicos, formularios on-line, etc.

El mapa visual ayuda a todas las personas que están involucradas en el proceso a observarlo de principio a fin. El mapa muchas veces tiene poco parecido con los manuales oficiales de la organización o con el concepto del proceso que tiene la empresa, ya que expone los esfuerzos duplicados y retrasos inútiles que se incorporaron como procedimientos estándar.

A continuación se muestra el mapa del proceso desarrollado sin considerar la etapa de consumo o combustión del carbón. Para facilitar la visualización del mapa de proceso será presentado como Anexo N°1. Mapa del Proceso Gestión del Combustible Carbón en la Central “Ejemplo”, a modo de poder revisar la completitud y en detalle las tareas incorporadas en el mapa.

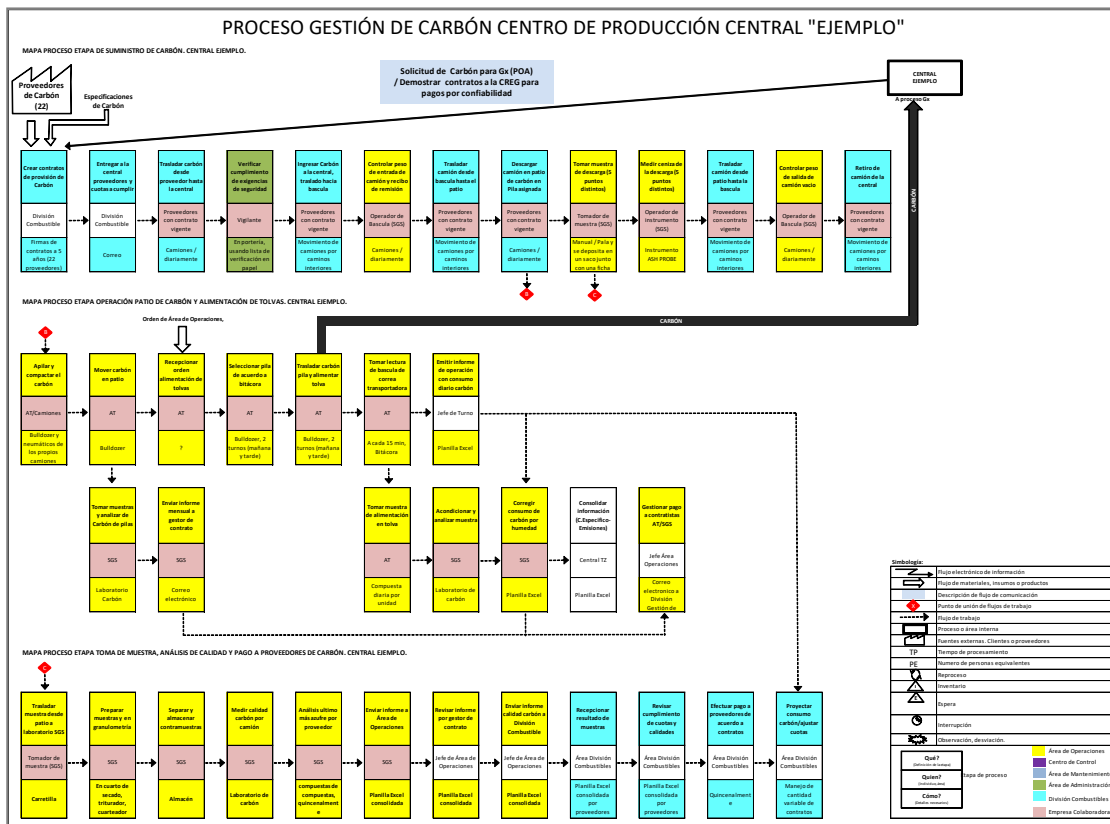


Figura N° 51. Mapa del proceso de la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

Respecto a la última etapa de consumo del carbón a continuación se muestra el diagrama del proceso “carboeléctrico” de la central “Ejemplo”, donde se visualizan los sistemas principales.

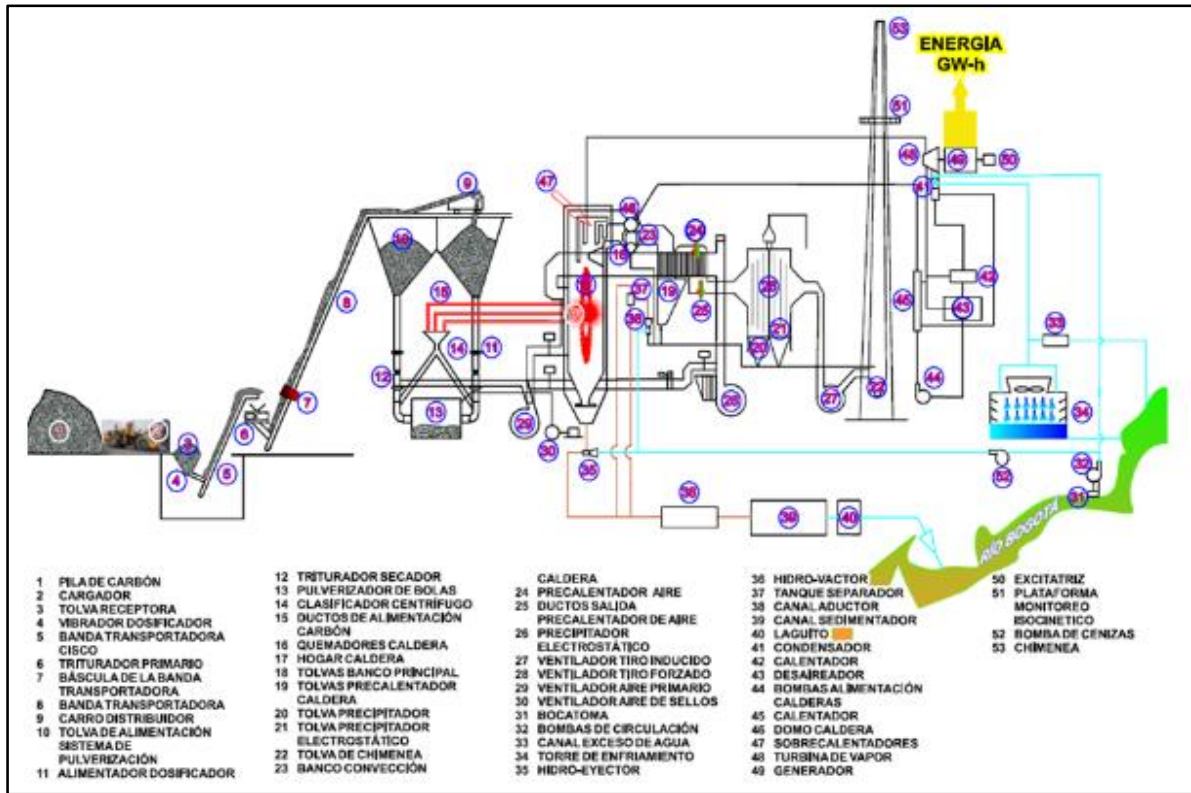


Figura N° 50. Diagrama de funcionamiento de la central “Ejemplo” (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2011)

Siguiendo las etapas de la figura anterior se ordenó gráficamente la secuencia resumida de las subetapas del proceso del manejo del carbón.



Figura N° 51. Etapas del proceso de producción de energía de la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

6.2 Búsqueda de potenciales causas del problema (x's).

Luego de revisar y comprender cada una de las etapas del proceso presentado en el mapa, se identificaron las variables claves, para ello se utilizó la herramienta SIPOC (Proveedores, Entradas, Proceso, Salidas, Clientes).

En el SIPOC las variables del proceso se identifican y se enumeran en el diagrama desde el 1 al 49 para las variables de entrada y desde el 50 al 74 para las variables de salida. Ver Anexo N°2. SIPOC, del presente documento.

En la tabla N°26 se elaboró y completó la matriz de entrada y salida del proceso, junto con la construcción del SIPOC, en donde se analizó el grado de afectación de las variables del proceso con el objetivo trazado para cada una de las iniciativas, con base en el conocimiento y experiencia recogida del proceso. En color amarillo se refleja el impacto que se le designó para cada variable del proceso sobre el objetivo de cada iniciativa abordada.

Por otro lado, habiendo estudiado la envergadura del proceso de combustión y generación de la energía eléctrica, además de podido efectuar visitas de reconocimiento y acompañamiento en la operación de los distintos sistemas que tienen directa afectación sobre la iniciativa de mejora en la eficiencia en el consumo de carbón, se ha decidido ejecutar un análisis adicional de las posibles causas que puedan afectar la eficiencia en el consumo, para lo que se han utilizado Diagramas de Espina de Pescado (Ishikawa) del flujo del proceso siguiendo las etapas de cada sistema.

En este método la línea principal del diagrama sigue la secuencia normal del proceso de combustión del combustible y posterior generación de energía eléctrica. Los factores que pueden afectar las características de calidad se agregan en el orden que les corresponde en la secuencia de flujo del proceso.

En el caso de ir agregando las causas potenciales hemos escogido como problema para generar los diferentes diagramas de causa - efecto, las causas principales de pérdidas monetarias que fueron resultado del método VACE (Variación del Consumo Especifico) presentado en el capítulo anterior de este trabajo para los meses de Enero a Julio 2013, correspondientes a INQUEMADOS, BAJA PRESIÓN DE CONDENSADOR, BAJA TEMPERATURA EN SALIDA DE INTERCAMBIADORES DE CALOR, según se muestra en el Diagrama de Pareto de la Figura N° 44.

A continuación mostraremos los Diagramas de espina de pescado elaborados para determinar las causas de afectación del proceso según el análisis antes señalado.

Posibles causas de Inquemados, carbón no combustionado o desaprovechado el cual es retirado como residuo mezclado junto con ceniza en la parte inferior de la caldera. Para esto se analizan las etapas de acopio, transporte en bandas, alimentación, molienda, secado, clasificación y combustión del carbón.

Tabla N° 26. Matriz causa-efecto del proceso.

Matriz Causa-Efecto ó QFD (Quality Function Deployment). Proceso Gestión del Carbón Central Ejemplo																		
Escala de Calificación: 0-10. [9 a 10 (Alto), 3 (Moderado), 1 (Bajo), 0 (Sin afectación)]																		
<p>Y's ó Características críticas para la calidad.</p> <p>Calificación del nivel de importancia de cada Y</p> <p>X's ó variables de entrada del proceso.</p> <p>Calificación de impacto o afectación de X1...n sobre Y1...q. (Relación de cada entrada (X), con cada salida (Y))</p> <p>Pareto de las entradas clave para efectuar Estudios de Capacidad de Proceso y Planes de Control del proceso.</p>																		
Etapa de mapa de Proceso	N° Variable SIPOC	Variables de entrada del proceso	Ranking de importancia para Cliente / proyecto	10				10				Y1: Mezcla de Carbón	Y2: Mejora en Eficiencia	Total				
				Y1 < Costo Variable Unitario del combustible Utilizando mezclas				Y2 < Costo Variable Unitario del combustible Mejorando Eficiencia en consumo de carbón										
			Membros del Equipo de Trabajo															
			NG	SP	AM	NS	SR	PV	NG	SP	AM	NS	SR	PV				
Asignación de proveedores, acuerdo de cuotas y calidades de entrega.	1	Cumplir resolución CREG. Cantidad de carbón que debe demostrar Termozipa para el Cargo por confiabilidad (Estimación de cuota fija + cuota variable proveedores)	4	4	4	3	3	3	0	0	0	0	0	0	210	0	210	
	2	Estimación de generación anual (Interna EMGESA) para estimación de consumo de Carbón (Estimación cuota Fija proveedores)	5	4	5	5	5	5	0	3	3	0	3	3	290	120	410	
	3	Stock mínimo de seguridad definido para Termozipa, para asegurar la generación siempre que el sistema eléctrico lo requiera	3	3	3	3	3	3	0	0	3	0	0	0	150	30	180	
	4	Especificaciones de carbón que requieren las unidades de Termozipa para la generación	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10	10	9	600	580	1180	
	5	Stock disponible en patio para control de ingreso (Aumenta o disminui cantidad de ingreso)	2	2	1	3	3	3	1	0	3	0	0	3	140	70	210	
	6	Calidades del carbón acordadas con cada proveedor	9	9	8	10	10	10	10	9	9	9	10	10	9	580	560	1140
	7	Cantidad de proveedores con contrato vigente	9	9	8	8	8	8	0	0	3	0	0	1	500	40	540	
	8	Capacidad de producción de cada proveedor.	6	6	6	7	5	7	0	0	3	0	0	0	370	30	400	
	9	Tiempo de entrega de cada proveedor, desde que se genera el pedido hasta la entrega en la central	3	3	3	3	3	3	0	0	3	0	0	0	150	30	180	
	10	Cumplimiento de cuotas y calidades históricas de proveedores (ranking)	0	0	3	0	3	3	0	3	3	0	3	3	90	120	210	
	11	Precio mercado/internacional IPPC (índice de precios productor de carbón), ICTC (Índice de Costo transporte de Carga)	7	7	7	6	7	7	0	1	3	0	3	1	410	80	490	
Suministro del carbón	12	Cantidad de camiones que ingresa a Termozipa, provenientes desde el lugar donde se ubica el proveedor y donde se realiza la extracción del carbón (Cundinamarca y Boyacá)	1	3	3	3	3	3	0	0	3	3	0	0	160	60	220	
	13	Tipo de camiones que ingresa a la central (Descarga manual, descarga automática, pequeño, grande, etc)	1	0	3	3	0	1	0	0	3	0	0	0	80	30	110	
	14	Revisión de documentos legales (Pagos de cotizaciones y seguridad social (chofer), Revisión del estado del vehículo (camión) y existencia de elementos de protección personal (chofer y vehículo)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0	10	
	15	Control de remisión y cantidad de entrega de cada camión y su correlación a proveedor correspondiente	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	60	0	60	
	16	Análisis Ash Probe (nivel de ceniza) de la carga de cada camión, al ingresar a la central	10	10	10	9	9	9	3	3	3	0	3	3	570	150	720	
	17	Toma de muestra para análisis de laboratorio de calidades de entrega	5	4	5	5	4	5	3	3	3	10	3	3	280	250	530	
	18	Cantidad y/o adaptación de canales de atención (N° de puertas de entrada, N° de basculas, N° de equipos Ash Probe, N° de tomadores de muestra, N° de tractores de descarga manual)	0	3	3	3	3	3	0	0	3	3	0	0	150	60	210	
	20	N° de pilas designadas para recibir el carbón aportado por tipo de proveedor, según calidades.	9	8	8	8	9	9	0	3	3	10	3	3	510	220	730	
Operación del patio de carbón	21,22	Procedimientos operativos y de seguridad para la correcta operación (Demarcación y señalización de pilas, orden de conformación de la pila-el carbón mas fresco al final de la pila que se esta conformando- compactación del terreno, acceso de vehículos, orden de llegada de la carga de cada camión, al ingresar a la central, compactación de pilas, planes de emergencia o contingencia, etc.)	9	8	9	9	8	8	0	3	3	10	3	9	510	280	790	
	23	Control periódico de inventario (Levantamiento Topográfico)	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	30	0	30	
	24	Distancia entre pilas y tolvas de alimentación.	9	8	9	8	9	9	3	3	0	10	3	0	520	190	710	
	25	Control de variabilidad de degradación de pila por tiempo de acopio (Análisis de laboratorio) y acciones a seguir en caso de cumplir ciertos niveles de alarma en parámetros críticos	9	9	10	9	9	9	9	3	9	3	9	9	9	550	420	970
	26	Orden de Área de Operaciones para indicar cantidad de carbón a suministrar a cada tolva para la generación, cumpliendo con especificaciones de cada caldera.	4	3	4	4	3	3	7	7	6	7	7	6	210	400	610	
Alimentación de tolvas para el proceso de generación.	27	Verificación del nivel de cada tolva de unidades de generación, previo a orden de alimentación de las mismas.	0	0	0	0	0	3	3	9	10	3	1	0	290	290		
	28	Muestra y análisis de laboratorio del carbón consumido por unidades y su trazabilidad (Carbón proveniente de pila X de fecha y hora inicio a fecha y hora término)	9	9	8	8	8	8	7	10	8	10	9	9	500	530	1030	
	29-32	Control de cantidad y Toma de muestra para Análisis de laboratorio. (Procedimiento normado, asegurar la trazabilidad)	5	5	5	6	4	4	0	9	10	9	9	9	290	400	750	
	33	Frecuencias para la realización de Análisis próximo (Central) y ultimo (SGS Barranquilla) de calidades de carbón ingresado a patio y consumido.	1	3	0	9	3	3	0	3	0	10	3	3	190	190	380	
Toma de muestras y análisis de laboratorio (Control de Calidad Carbón de ingreso y consumo)	34	Definición de parámetros para la realización de Análisis próximo (Central) y ultimo (SGS Barranquilla) de calidades de carbón ingresado a patio y consumido.	9	9	9	9	8	9	0	0	10	3	3	3	530	160	690	
	35,36	Métodos de cálculo definidos y operativos para: pago de proveedores y contratistas de patio	8	8	7	8	7	8	0	0	0	0	0	0	460	0	460	
	35,36	Métodos de cálculo definidos y operativos para: cálculo de eficiencia y cálculo de parámetros medioambientales	6	7	6	6	6	6	9	9	9	9	9	9	370	540	910	
Liquidación y pago contratistas Carbón	37	Información para pago a proveedores: Volúmenes y calidad de carbón suministrado y consumido	8	8	9	8	8	8	0	0	0	0	0	0	500	0	500	
	38	Grado de Cumplimiento de Condiciones contractuales	6	6	5	6	5	0	0	0	0	0	0	0	340	0	340	
Emisiones Medio Ambientales	39	Información Emisiones ambientales particulado, SO2, NOX, CO	9	9	9	9	9	0	0	0	0	0	0	0	530	0	530	
	40	Precio ofertado por cada unidad y costo marginal de mercado.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Generación de Energía Eléctrica	41	Procedimiento para calculo de costo variable de combustible	7	7	8	7	7	7	10	10	0	10	9	9	430	480	910	
	42	Orden de generación por merito o por seguridad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	43	Stock de carbón	5	6	6	6	5	6	0	0	0	0	0	0	340	0	340	
	44	Carbón pulverizado impulsado por aire hacia el difusor del quemador de la caldera	0	0	0	0	0	0	10	10	9	10	10	10	0	590	590	
	45	Oxígeno inyectado al difusor del quemador de la caldera	0	0	0	0	0	0	9	8	9	9	9	9	0	530	530	
	46	Agua tratada para ciclo Agua-Vapor	0	0	0	0	0	0	9	9	10	10	9	9	0	560	560	
	47	Agua cruda para enfriamiento del vapor en el Condensador	0	0	0	0	0	0	9	8	9	9	10	0	540	540		
	48	Disponibilidad de las unidades/Desvíos del programa de generación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	49	Servicios Auxiliares (Energía eléctrica para alimentar equipos del proceso tales como compresores, bombas, ventiladores, etc)	9	9	0	0	3	0	10	10	10	8	8	8	210	550	760	
	72	Energía demandada por XM (Operador del Sistema Eléctrico)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	73	Pérdidas del proceso de generación (Inquemados, Mate Up, servicios auxiliares, Atemperación, mala transferencia de calor por baja presión condensador, escoria en tubos de caldera, etc)	9	10	9	10	9	9	10	10	10	10	10	10	560	600	1160	

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida durante aplicación práctica de la herramienta “Matriz Causa-Efecto” durante el desarrollo de esta tesis en la central Ejemplo.

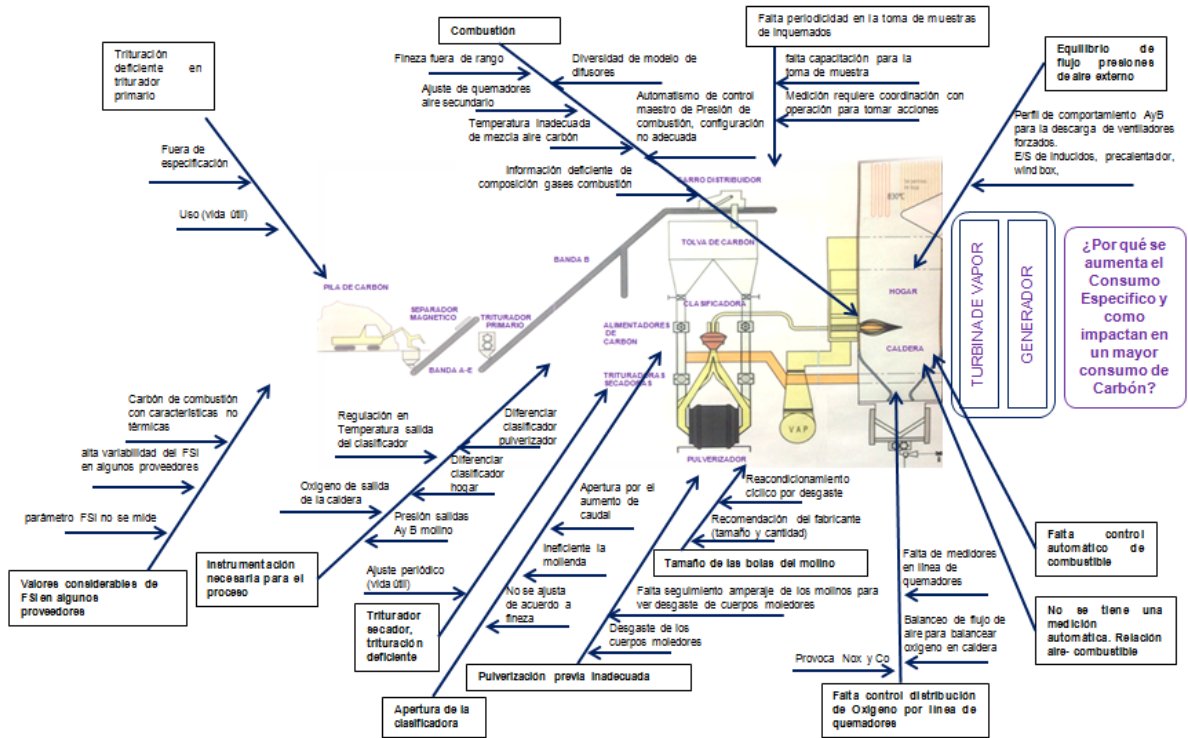


Figura N° 54. Diagrama espina de pescado del proceso. (Elaboración Propia, 2014)

Posibles causas de baja presión del condensador y baja temperatura en la salida de intercambiadores de calor.

Posteriormente se analizan las etapas del sistema del ciclo de Agua-Vapor al interior de la central “Ejemplo”, en donde las potenciales causas detectadas en los diagramas de espina de pescado fueron posteriormente analizadas en una matriz FMEA que está desarrollada en el Anexo N°3.

del presente trabajo que por extensión no se incorporó en el cuerpo principal del documento. El propósito de este análisis es reconocer los potenciales causas de falla e identificar para priorizar el impacto en el proceso y con ello detectar las causas vitales a mitigar y poder efectuar planes de mejora y control de cada iniciativa.

Posteriormente se analizaron los resultados por medio de los Diagramas de Pareto que resultaron de la matriz de causa y efecto los que arrojan las variables a medir y también se mostraron los resultados de la matriz FMEA efectuada para ambas iniciativas.

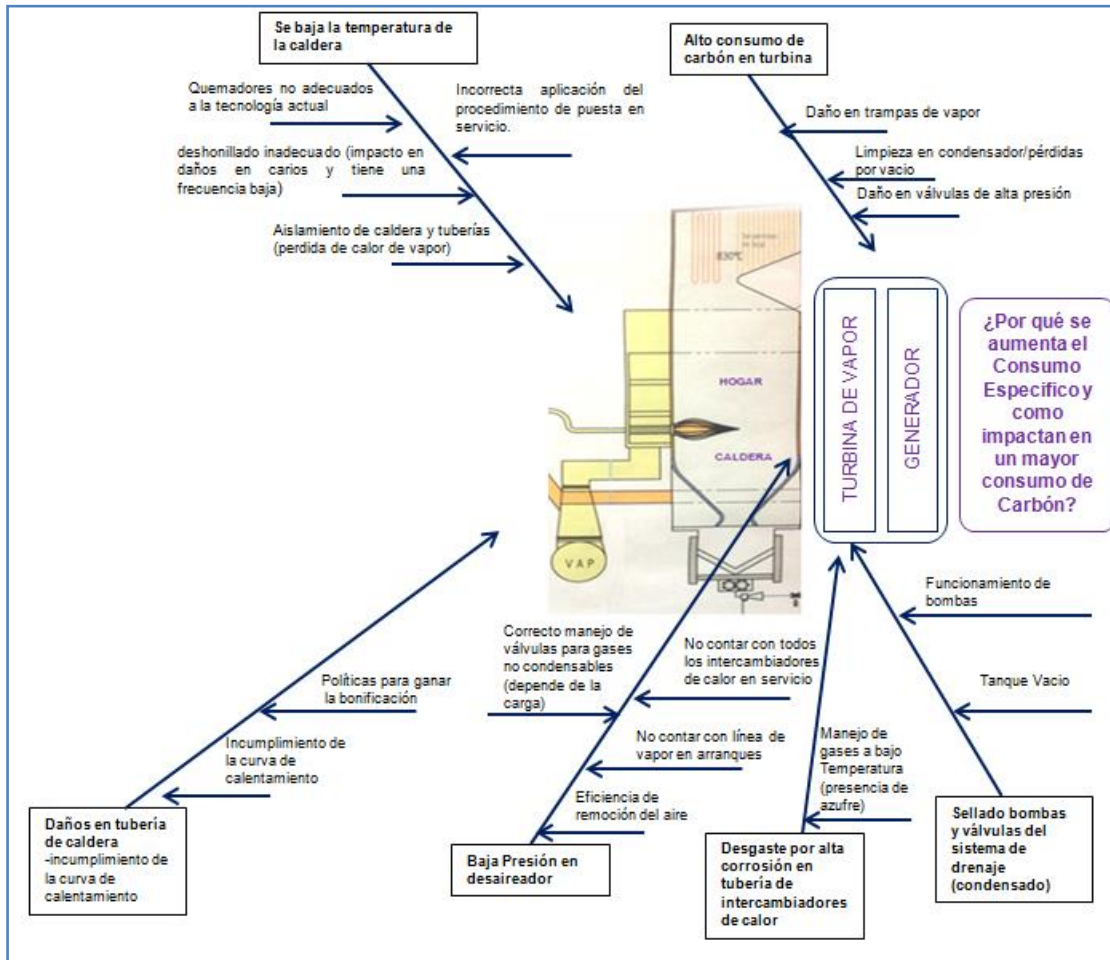


Figura N° 52. Diagrama espina de pescado del proceso. (Elaboración propia, 2014)

6.3 Priorización de las principales causas.

Se obtuvieron los siguientes Diagramas de Pareto resultantes de la matriz causa y efecto de cada iniciativa:

Y1: Reducción del precio de la tonelada del combustible utilizando mezclas de carbón

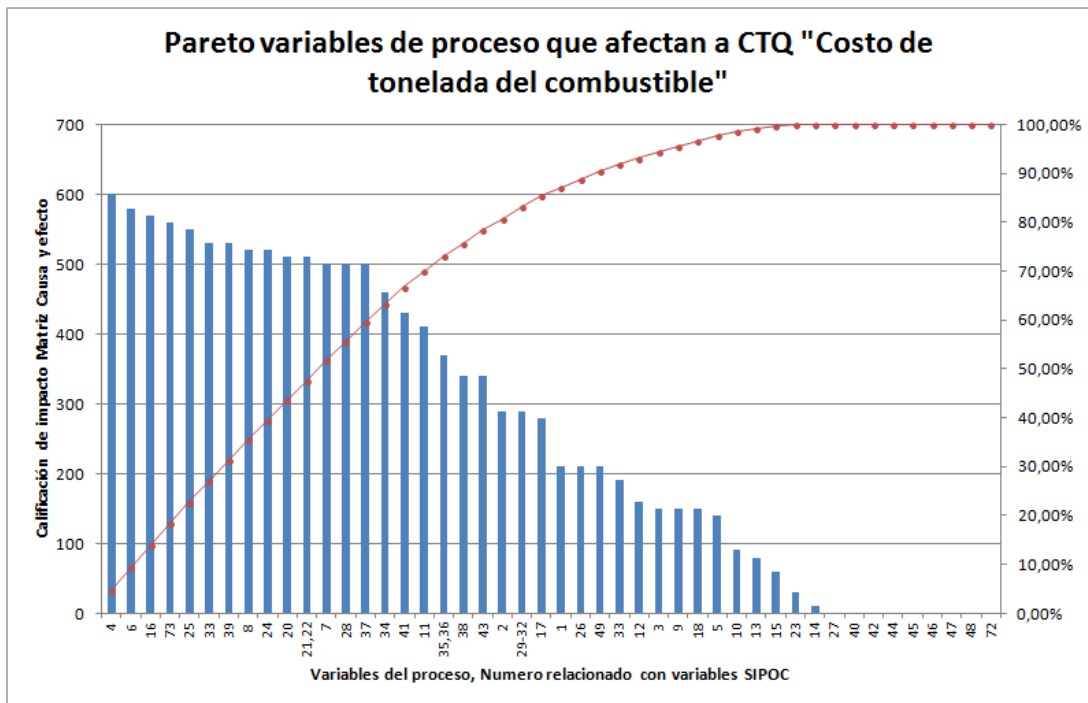


Figura N° 53. Diagrama de Pareto en función de la variable Y1. (Elaboración propia, 2014)

Del diagrama anterior, es posible apreciar que las variables ordenadas de mayor a menor, según su impacto, presentan un resultado similar, superior a 500, hasta la variable 28, formando una meseta en la gráfica que agrupa el de 58% de la calificación y luego los impactos de cada variable representadas hacia la derecha en la gráfica, descienden notoriamente, consideraremos que las variables que acumulan el 70% del impacto identificado del Diagrama de Pareto serán nuestros pocos vitales para el análisis de causas potenciales, las variables seleccionadas están indicadas en la siguiente tabla.

Tabla N° 27. Selección de variables según Diagrama de Pareto.

N° Variable SIPOC	Descripción de la variable de proceso	N° Variable SIPOC	Descripción de la variable de proceso	N° Variable SIPOC	Descripción de la variable de proceso
4	Especificaciones de carbón que requieren las unidades de Tiempo para la generación	33	Definición de parámetros para la realización de Análisis proximo (Central) y último (SGS Barranquilla) de calidades de carbón ingresado a pátio y consumido.	7	Cantidad de proveedores con contrato vigente
6	Calidades del carbón acordadas con cada proveedor	39	Información Emisiones ambientales particulado, SO ₂ , NO _x , CO	26	Muestra y análisis de laboratorio del carbón consumido por unidades y su trazabilidad (Carbón proveniente de pila X de fecha y hora inicio a fecha y hora término)
16	Análisis Ash Probe (resal de ceniza) de la carga de cada camión, al ingresar a la central	8	Capacidad de producción de cada proveedor	37	Información para pago a proveedores: Volúmenes y calidad de carbón suministrado y consumido
	Pérdidas del proceso de generación (quemados, Make Up, servicios auxiliares, Atemperación, mala transferencia de calor por baja presión condensador, escoria en tubos de caldera, etc)	24	Distancia entre pilas y tolvas de alimentación	34	Métodos de cálculo definidos y operativos para pago de proveedores y contratistas de pátio
73	Control de variabilidad de degradación de pila por tiempo de accepo (Análisis de laboratorio) y acciones a seguir en caso de cumplir ciertos niveles de alarma en parámetros críticos	20	N° de pilas designadas para recibir el carbón aportado por tipo de proveedor, según calidades.	41	Procedimiento para cálculo de costo variable de combustible
		21,22	Procedimientos operativos y de seguridad para la correcta operación (Demarcación y señalización de pilas, orden de conformación de la pila-el carbón más fresco al final de la pila que se esta conformando-, compactación del terreno, acceso de vehículos, orden de llegada para la descarga, altura máxima, talud de seguridad, geometría de pilas, planes de emergencia o contingencia, etc)	11	Precio mercado/internacional BPPC (índice de precios productor de carbón), ICTD (índice de Costo transporte de Carga)

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida durante aplicación práctica de la herramientas de mejora de procesos, durante el desarrollo de esta tesis en la central Ejemplo.

Y2: Mejora en la eficiencia de consumo de carbón en unidades de generación

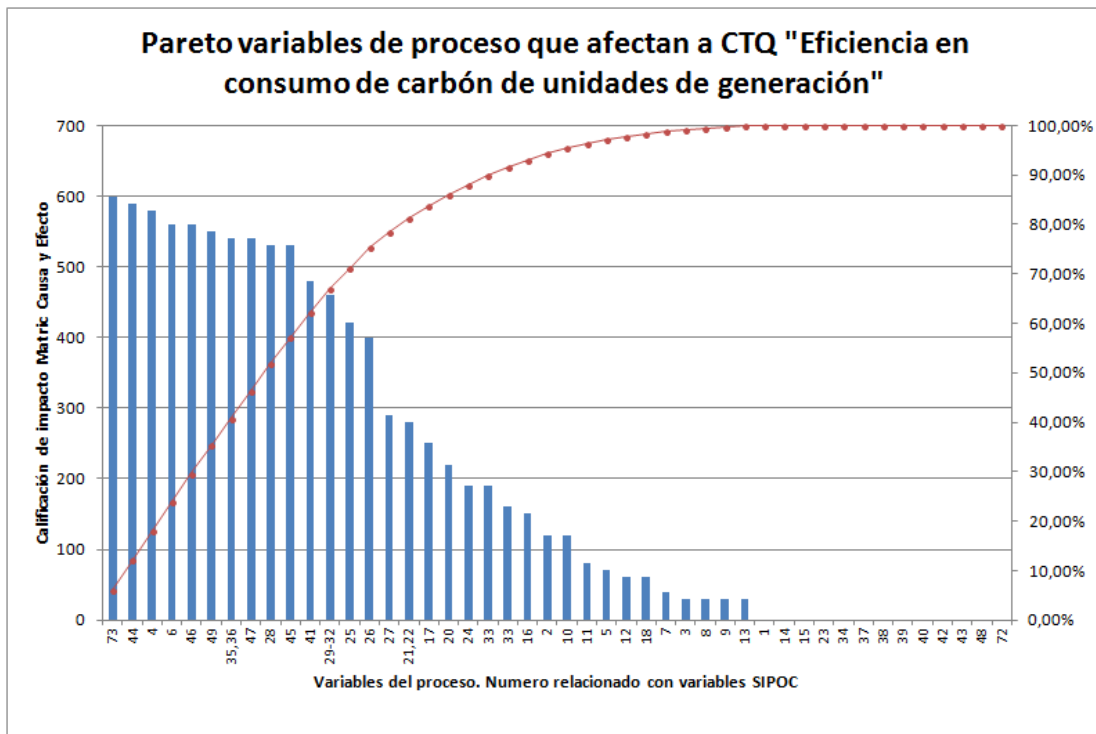


Figura N° 54. Diagrama de Pareto en función de la variable Y2. (Elaboración propia, 2014)

Similar al análisis efectuado para la figura N°53, consideraremos que las variables que acumulan el 70% del impacto identificado del Diagrama de Pareto serán nuestros pocos vitales para el análisis de causas potenciales. Las variables seleccionadas están indicadas en la siguiente tabla.

Tabla N° 28. Selección de variables según Diagrama de Pareto. (Elaborado por los autores de esta tesis)

N° Variable SIPOC	Descripción de la variable de proceso	N° Variable SIPOC	Descripción de la variable de proceso
73	Pérdidas del proceso de generación (quemados, Make Up, servicios auxiliares, Atemporación, mala transferencia de calor por baja presión condensador, escoria en tubos de caldera, etc)	35-36	Métodos de cálculo definidos y operativos para cálculo de eficiencia y cálculo de parámetros medioambientales
44	Carbón pulverizado impulsado por aire hacia el difusor del quemador de la caldera	47	Agua cruda para enfriamiento del vapor en el Condensador
4	Especificaciones de carbón que requieren las unidades de Termoziga para la generación	28	Muestra y análisis de laboratorio del carbón consumido por unidades y su trazabilidad (Carbón proveniente de pila X de fecha y hora inicio a fecha y hora término)
6	Calidades del carbón acordadas con cada proveedor	46	Oxígeno inyectado al difusor del quemador de la caldera
46	Agua tratada para ciclo Agua-Vapor	41	Procedimiento para cálculo de costo variable de combustible
49	Servicios Auxiliares (Energía eléctrica para alimentar equipos del proceso tales como compresores, bombas, ventiladores, etc)	29-32	Control de cantidad y Toma de muestra para Análisis de laboratorio. (Procedimiento normado, asegurar la trazabilidad)

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida durante aplicación práctica de la herramientas de mejora de procesos, durante el desarrollo de esta tesis en la central Ejemplo.

Con el propósito de identificar los modos potenciales de fallas de las causas detectadas en ambas iniciativas según lo mostrado en las Tablas N°27 y N°28 de los pocos vitales se encontraron variables de procesos que potencialmente afectan a ambas iniciativas. Para ello se elaboró una matriz única a modo de fallo que incorpora el análisis las variable “Pocos Vitales” arrojadas por la Matriz de Causa y Efecto más las potenciales causas identificadas con los diagramas de espina de pescado de los sistemas de acopio, transporte, molienda, clasificación, secado y combustión del carbón y posterior procesos de generación de energía eléctrica, lo anterior con el propósito de lograr un único plan de acciones preventivas y/o correctivas de las principales causas detectadas.

En el Anexo N°3. Matriz FMEA, se muestra la matriz consolidada a modo de fallo con la acción recomendada y la propuesta para su implementación (responsable).

6.4 Obtención de datos representativos de las potenciales causas (x's) y del indicador del proyecto (Y).

Como resultado de la matriz FMEA del anexo N°3 se identifican las siguientes variables críticas que requieren de un análisis mayor.

Las variables catalogadas como pocos vitales de ambas iniciativas junto con las acciones que corresponde efectuar en esta etapa son las siguientes:

Tabla N° 29. Tabulación de variables que son pocos vitales.

N° Variable SIPOC	Descripción de la variable de proceso	Acción
73	Pérdidas del proceso de generación (Inquemados, Make Up, servicios auxiliares, Atemperación, mala transferencia de calor por baja presión condensador, escoria en tubos de caldera, etc.)	Medir datos históricos del método VACE
4	Especificaciones de carbón que requieren las unidades de Termozipa para la generación	Requiere estudio técnico
6	Calidades del carbón acordadas con cada proveedor	Medir datos de parámetros históricos de base de datos de laboratorio
41	Procedimiento para cálculo de costo variable de combustible	Requiere crear procedimiento

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida durante aplicación práctica de la herramientas de mejora de procesos, durante el desarrollo de esta tesis en la central Ejemplo.

6.4.1 Pérdidas en el proceso de generación (Variable N°73, SIPOC).

Como ya mencionamos, en la situación actual se muestran las pérdidas mensuales informadas por la central de acuerdo a lo indicado en la

Tabla N° 23. Tabulación de las pérdidas informadas para las unidades de la central “Ejemplo”, y las causas asociadas en cada unidad de generación de acuerdo a lo indicado en la Figura N° 44. Diagrama de Pareto producto del análisis de pocos vitales de causas de variación del consumo específico de la central “Ejemplo”, para el período comprendido entre Enero y Julio de 2013, excepto la unidad N°2 la que por su baja potencia instalada no fue monitoreada.

De este modo y como habíamos visto en la etapa de definición del capítulo N°4 del presente trabajo hemos querido profundizar en el principal factor de pérdidas, que corresponde a los “Inquemados”, para lo que debemos recordar que según información presentada por personal de la central “Ejemplo” el año 2009 se habían efectuado una serie de acciones con el propósito de cumplir con la nueva resolución N° 909, la que restringe las emisiones medio ambientales según expuesto en el punto 5.4.2.

Las acciones se centraron en implementar mejoras técnicas en los precipitadores electrostático para cumplir con el parámetro exigido del material particulado. Estas mejoras fueron efectuadas en las distintas unidades de la central, además se cambiaron las especificaciones de compra del carbón, elevando el poder calorífico de 5900 kcal/kg a 6900 kcal/kg. Esta medida propició una reducción en el porcentaje de ceniza y por tanto en las emisiones del material particulado, no obstante como parte de esta tesis se trabajó en obtener un registro del comportamiento para los “inquemados” en la combustión del carbón, en donde se obtuvo la siguiente gráfica considerando los datos de todas las unidades de la central “Ejemplo”, en él se efectúa un promedio ponderado considerando la potencia instalada de las unidades.

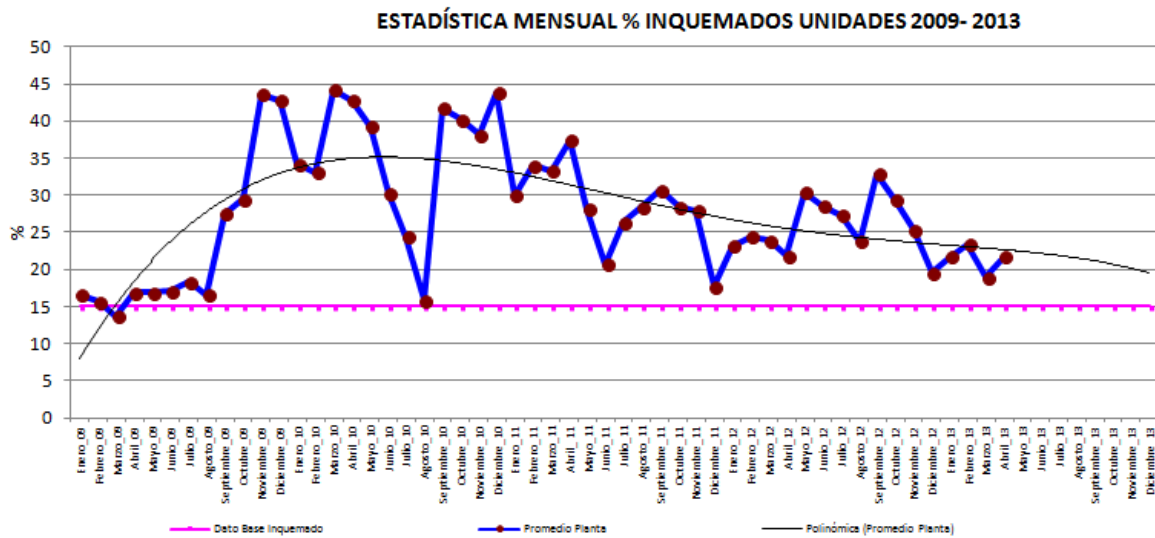


Figura N°58 – Estadística de inquemados en central “Ejemplo” (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

Según la Fig. N°58 se muestra un comportamiento alejado de las exigencias de “inquemados” de las centrales térmicas convencionales que pertenecen al mismo grupo de empresas de generación, el que debe ser del orden del 8% como máximo valor permitido. Esta situación no ha sido lograda en la central “Ejemplo”, según los datos que se cuentan desde antes y después del cambio de la especificación de compra de carbón implementada a contar del año 2009.

Además se observa un aumento del porcentaje de “inquemados”, desde la fecha que se comenzó a recibir carbón bajo la nueva especificación, y el que puede estar relacionado con los nuevos parámetros de calidad exigidos que se estudiarán estadísticamente en la etapa de análisis.

Se realizó un análisis respecto a las causas de estos “inquemados”, donde se detectan dos potenciales causas importantes:

a) Trituración inadecuada del carbón previo a la entrada en el quemador de la caldera en forma de “polvo” para su combustión, esto según se indica en el análisis de en la Matriz FMEA puede deberse a varios factores, que resumidos en factores de control operativo tales como; control de la apertura de la clasificadora que controla el retorno de gruesos al pulverizador, falta de control y medición de finezas en distintos puntos de las etapas de trituración, entre otras indicadas en la matriz, las cuales ya tienen su contra medida propuesta y responsable y por otro lado se tiene la inadecuada pulverización debido a que los cuerpos molidores o bolas del molino, presentan desgaste y en vez de efectuar su recambio, actualmente se realiza el relleno con bolas nuevas, lo cual posiblemente es causante de otros desperfectos tales como fallas encontradas en los reductores de velocidad de los molinos de las unidades de generación, posiblemente al sobre peso que producen el relleno de bolas.

b) Especificación inadecuada del carbón consumido. Lo que tiene relación con las variables críticas de proceso N°4 y N°6 del análisis SIPOC para ambas iniciativas. Lo que se ha investigado respecto a este aspecto durante la realización de este trabajo, es que tiene relación los niveles actuales del parámetro de carbones denominado “**Índice de Hinchamiento Libre**” o FSI por sus siglas en inglés (Free Swelling Index), lo que podría estar ocasionando problemas en la combustión, producto de una alteración en la llama. Este parámetro específicamente se analizará en la siguiente variable crítica recogida de la matriz FMEA “Especificaciones de carbón que requieren las unidades de “Ejemplo” para la generación”. Es importante señalar que hoy en día este parámetro no es controlado formalmente ya que no es parte de las especificaciones contractuales de compra de Carbón ni de análisis de calidad en laboratorio, en la actualidad se miden en ciertos meses a pedido de la empresa generadora, el carbón de ingreso, pero no el carbón de consumo, por tanto hoy no podremos demostrar esta hipótesis. Sin embargo se ha incorporara al plan de mejora y en el programa de control propuesto para implementar.

6.4.2 Especificaciones de carbón que requieren las unidades de central “Ejemplo” para la generación (Variable N°4 del SIPOC)

Como se vio en la etapa de definición presentada en el capítulo 5 del presente trabajo las especificaciones de fábrica de las calderas respecto al poder calorífico y para el porcentaje de ceniza del carbón, éste debe ser consumido, en rangos distintos para la unidad N°2 en comparación al resto de las unidades. Además se evidencia que los valores especificados de estos parámetros para las unidades N° 3,4 y 5 son mucho menos exigentes en comparación a lo especificado hoy en día en los contratos de suministro del carbón abriendo una oportunidad de poder disminuir la calidad del carbón y con ello disminuir el costo unitario. Sin embargo como se mencionó en ésta etapa de la metodología (definición) a partir del año 2011 comenzó a regir la resolución N° 909, la que regula las emisiones medio ambientales estableciéndose para la central “Ejemplo” un valor máximo de **100 mg/m3** de material particulado, lo que no se cumpliría en caso que el objetivo fuese cumplir con las especificaciones de diseño de las calderas, es por ello que para la variable N°4 del SIPOC “**Especificaciones de carbón que requieren las unidades de “Ejemplo” para la generación**”, se ha definido efectuar un estudio con base experimental que permita encontrar el punto óptimo de operación tanto visto de la perspectiva técnica como económica para cada una de las calderas.

6.4.3 Calidades del carbón acordadas con cada proveedor (Variable N°6 del SIPOC)

Para la variable N°6 del análisis SIPOC se determinó que el precio del carbón reliquidado a los distintos proveedores depende de los distintos parámetros de calidad, que en su mayoría son establecidos en las especificaciones contractuales de compra que actualmente están vigentes. A continuación se mostramos un análisis del comportamiento histórico de los principales parámetros exigidos, que se han escogido luego de los resultados de los análisis efectuados en los pasos anteriores del presente trabajo, que son los siguientes:

- Poder calorífico superior. (Especificación contractual establece 6900 kcal/Kg)
- Porcentaje de ceniza. (Especificación contractual establece porcentaje menor a 15%)
- Factor de Hinchamiento. (No se establece límite en especificación contractual, pero es medido como pedido especial de la empresa generadora al contratista de laboratorio en períodos de alto ingreso de carbón).

Para el análisis de los parámetros anteriores, se toma una muestra estadística de los resultados quincenales ponderados de laboratorio para cada proveedor, tomando los datos históricos desde Enero de 2012 hasta Junio de 2013.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

- Análisis de datos de **Poder Calorífico Superior**, con resultados quincenales ponderados de laboratorio para cada proveedor (Muestra de 577 datos recopilados entre Enero 2012 a Junio 2013).

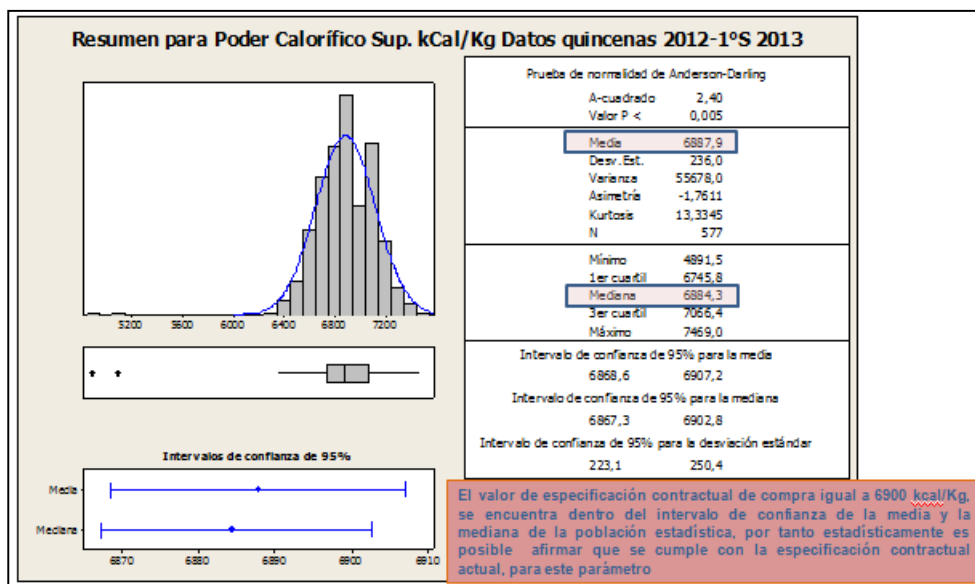


Figura N° 55. Histograma para el Poder Calorífico del Carbón de ingreso a la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

Si consideramos las especificaciones de fábrica de las calderas para definir límites de especificación y objetivo a alcanzar, se obtiene el siguiente análisis de capacidad de proceso.

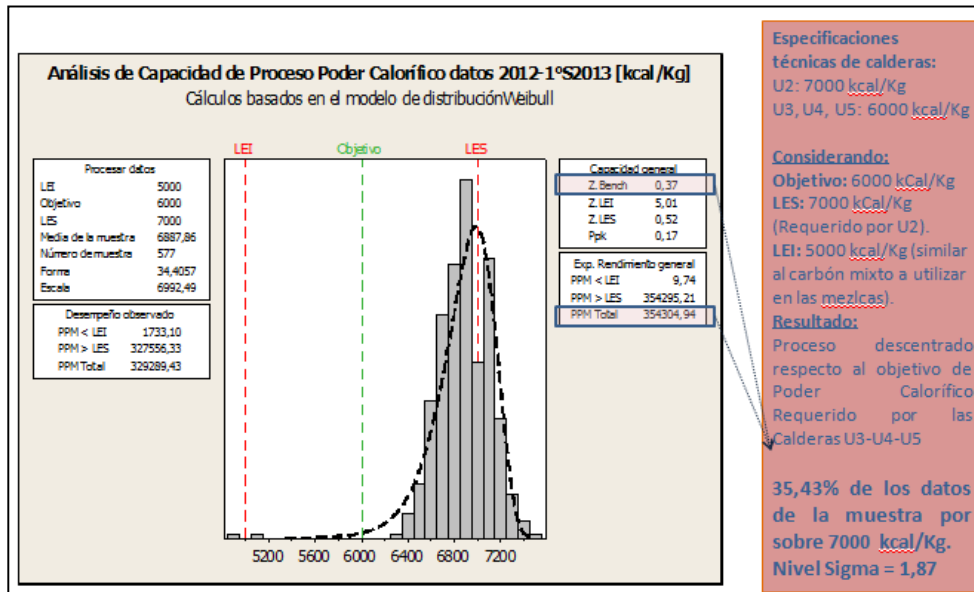


Figura N° 56. Capacidad de Proceso para el Poder Calorífico del Carbón de ingreso a la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

- b) Análisis de los datos de **Porcentaje de Ceniza** con información quincenal ponderados entregados por laboratorio para cada proveedor (Muestra con 577 datos recopilados entre Enero 2012 a Junio 2013).

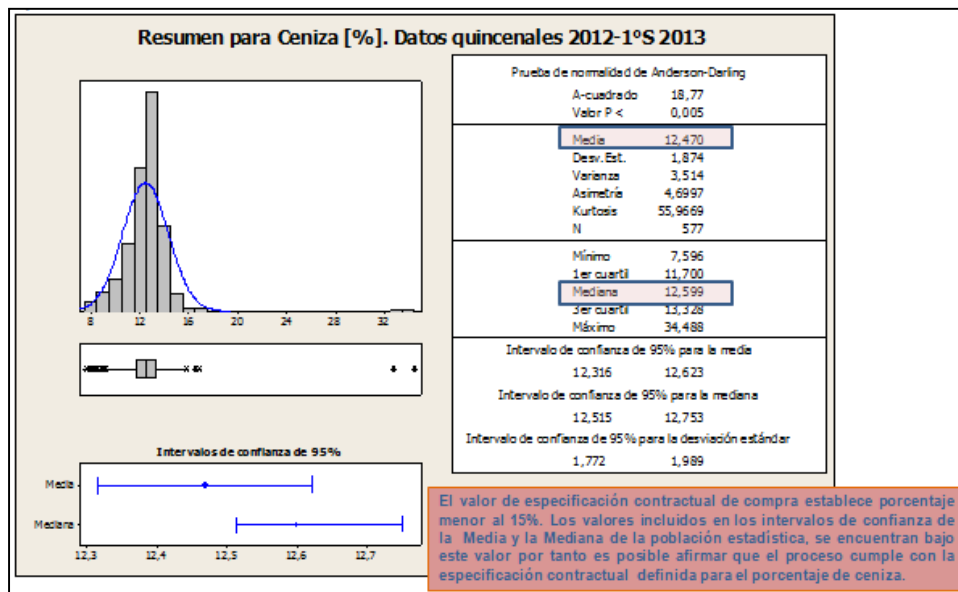


Figura N° 57. Histograma para el % de Ceniza del Carbón de ingreso a la central Ejemplo. (Elaboración propia, 2014)

Si establecemos como límite superior de aceptación, al valor de aceptación de la carga de carbón ingresado por los camiones en las especificaciones contractuales ($\leq 15\%$), en análisis de capacidad de proceso para este parámetro es el siguiente:

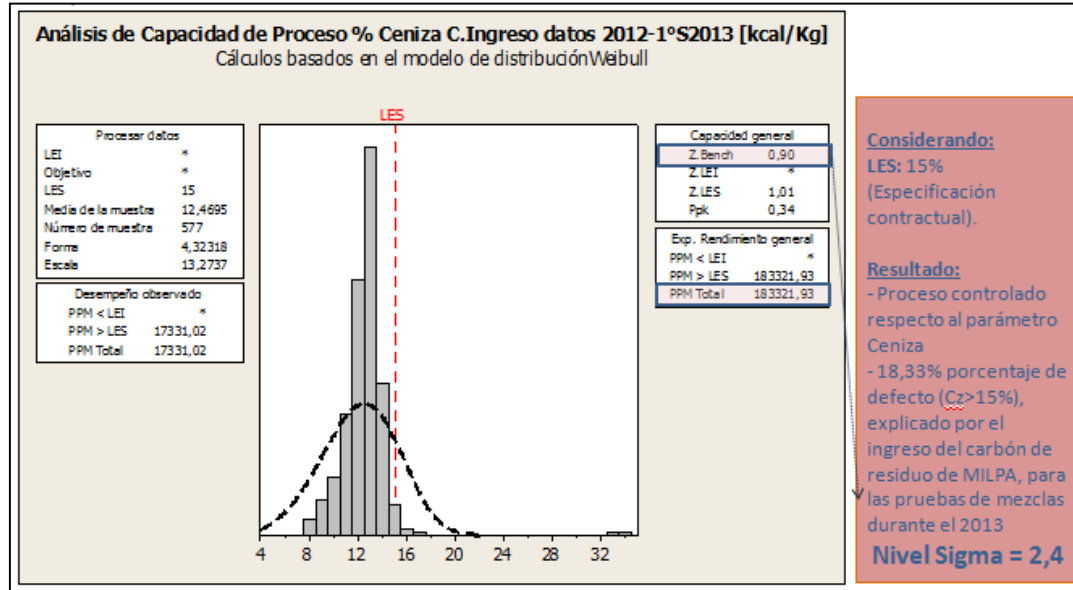


Figura N° 58. Capacidad de Proceso para el % de Ceniza del Carbón de ingreso a la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

- c) Análisis de los datos de **Índice de Hinchamiento (FSI)** de valores ponderados mensuales de resultados de laboratorio, entregados para cada proveedor. Datos de meses entre Noviembre a Abril 2013.

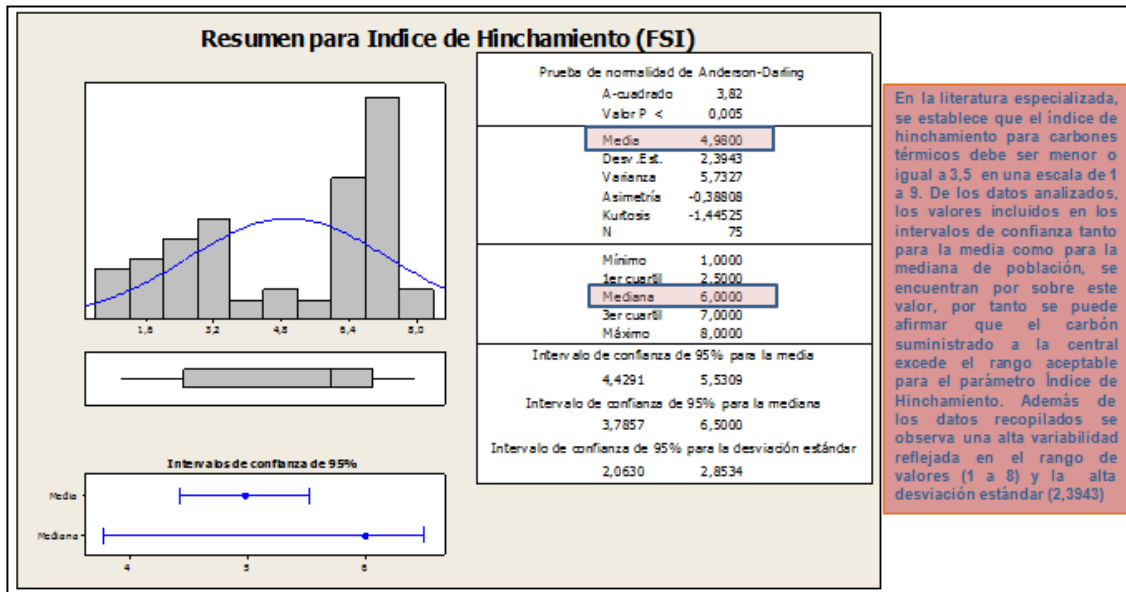


Figura N° 59. Histograma para el porcentaje de Ceniza del Carbón de ingreso a la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

6.4.4 Procedimiento para cálculo de costo variable de combustible (Variable N°41 del SIPOC).

Respecto a esta variable crítica corresponde indicar que tal como se mencionó en la etapa definir del capítulo N°4, actualmente el costo variable del combustible se obtiene del costo de la tonelada de combustible puesta en el patio de carbón (Información que se obtienen mensualmente de los pagos a los diferentes proveedores asociados al carbón), junto con el dato de factor de consumo en Ton/MWh de cada unidad de generación, el que está directamente relacionado con el consumo específico de cada unidad y corresponde a una de las derivadas de la curva base de consumo para los distintos valores de carga de cada unidad.

Durante la elaboración de este trabajo se pudo detectar que no existe un procedimiento que actualice la curva de consumo de acuerdo a los resultados operacionales y que posteriormente se formalice los resultados a las áreas comerciales para el cálculo del costo variable, lo que es fundamental para observar el cambio de comportamiento del costo variable con las mejoras que se propondrán como parte de este trabajo, que es parte integrante del plan de acción para su posterior implementación como mejora de proceso.

6.4.5 Resultado de análisis de variables críticas.

En función del resultado de los análisis efectuados en la situación actual para los parámetros principales de la variable del proceso; “Especificaciones de carbón que requieren las unidades de la central “Ejemplo” para la generación” se desprende el siguiente análisis:

El poder calorífico del carbón suministrado que actualmente supera las especificaciones de las calderas de las unidades N°3, N°4 y N°5 y que sólo se ajusta a las especificaciones de la unidad N°2, por lo tanto el precio de compra es mayor al precio que se podría conseguir para el carbón requerido por las calderas de las unidades 3, 4 y 5.

Respecto a lo anterior es importante mencionar que de acuerdo a la clasificaciones de los carbones, las normas ASTM fijan un estándar clasificando como de “bajo rango” aquellos carbones cuyo poder calorífico bruto en base húmeda sea menor a 6.390 Kcal/Kg, rango en el que califica el carbón especificado para las unidades 3, 4 y 5 y que concuerda con los carbones denominados sub-bituminosos. Los carbones de “Alto rango”, son aquellos con un poder calorífico mayor a 6.390 Kcal/Kg, donde se incluyen los carbones “bituminosos y antracitos”, cuyos usos se dan tanto en la generación de energía como para el caso de los bituminosos de tipo térmico o en la industria siderúrgica y de acero en el caso de los bituminosos de tipo metalúrgico.

En la siguiente gráfica se muestra la clasificación de carbones según norma ASTM, la situación actual de la central “Ejemplo” y la especificación de fábrica

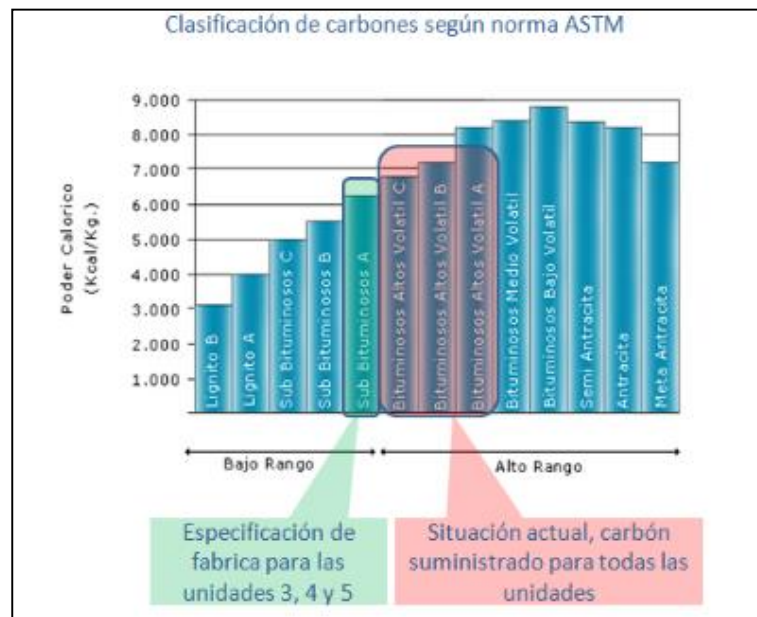


Figura. N°64 – Diagrama con clasificación de carbón. (Elaboración propia, 2014)

Respecto a los desvíos de consumo específico que se producen a causa de un poder calorífico del carbón de consumo superior al nominal, situación que fue detectada en la matriz a modo de fallo, que se traduce en pérdidas en el proceso con un efecto en cadena en las distintas etapas del mismo, lo que se resume de la siguiente manera partiendo desde la etapa de producción de vapor hacia las etapas antecesoras del proceso; Provoca aumento de la temperatura del vapor principal a valores superiores al nominal. Este aumento de temperatura es regulado automáticamente por el sistema de control de la caldera de cada unidad de

generación a través de una válvula (atemperación) que ingresa vapor a menor temperatura justo antes del ingreso a la turbina, situación que implica un reproceso, ya que el vapor primero se calienta para posteriormente tener que enfriarlo, lo que conlleva a un mayor consumo de carbón y agua tratada para generar más vapor que el estrictamente necesario, así como también mayor utilización de las bombas de agua de recirculación para bombear el agua adicional que requiere el vapor de atemperación y en consecuencia mayor consumo de energía de los servicios auxiliares, tal como pudimos evidenciar en el caso de las unidades 3 y 4, donde se utilizan hasta 3 bombas de recirculación en el proceso en vez de 2 como estipula el diseño.

Esta situación se acentúa al no contar con un sistema de control automático para regular los parámetros de combustión en las calderas de las unidades 3, 4 y 5, ya que actualmente se cuenta con un control maestro de presión de tipo neumático de regulación manual. Lo anterior requiere de una alta intervención o dependencia de operadores para manejar de manera óptima los parámetros de combustión de la caldera, lo que a su vez hace más complejo el proceso porque se incorporan limitaciones de la instrumentación que fueron detectadas en el reconocimiento del proceso; como por ejemplo que para efectuar el control de la distribución de oxígeno al interior de ésta, se cuenta con un medidor fijo solo al centro de la caldera en la parte superior, haciendo necesario la utilización de instrumentos manuales y un operador de terreno para medir puntualmente el nivel de oxígeno en los costados y así poder balancear el nivel en la caldera para lograr una correcta combustión.

Respecto al parámetro de “**Índice de Hinchamiento Libre**” o FSI, es importante señalar que este se mide en una escala de 1 a 9 y que refleja el grado de aglomeración o hinchamiento del carbón al calentarse. Los valores altos en la escala indican que el carbón tiene buenas características para ser coquizado y posteriormente ser utilizado en hornos metalúrgicos y siderúrgicos, sin embargo la característica anterior no es favorable para la combustión de carbón pulverizado, para lo que se utilizan carbones con bajo índice de hinchamiento, lo anterior es debido a que a mayor aglomeración disminuye la velocidad de combustión a diferencia de carbones cuyos valores de FSI son menores a 3,5.

Según lo revisado en el artículo “Influencia del índice de aglomeración (Hinchamiento), en la combustión de carbón pulverizado” (Combustión industrial, 2013), al utilizar carbones con niveles altos de FSI en procesos de combustión térmica, donde se utiliza el carbón pulverizado, trae como consecuencia un comportamiento inadecuado en la combustión, debido a que el carbón tenderá a aglomerarse disminuyendo la velocidad de combustión acortando la llama y concentrando el calor en la salida del difusor producto de la aglomeración, lo que puede ser causa importante del porcentaje de inquemados, además de conllevar otras consecuencias graves, tales como daños en los difusores en el refractario o paredes de la caldera.

De los resultados obtenidos podemos observar que la distribución del comportamiento de este indicador tiene una alta variabilidad (Rango de 1 a 8) y un comportamiento que no es normal, por lo tanto debemos referirnos a la mediana como parámetro estadístico de tendencia central, teniendo como resultado para este proceso un valor de FSI = 6, el cual es muy superior a 3,5 considerado como límite para carbones de tipo térmico.

Lo anterior puede ser una causa importante de problemas asociados a la combustión, tales como las pérdidas por “inquemados” que se tienen históricamente en las distintas unidades de la central “Ejemplo”.

Por otro lado carbones con alto valor de FSI o de tipo metalúrgico, se encuentran en el rango superior en cuanto a clasificación según normas ASTM, es decir tienen un mayor poder calorífico lo que en el comienzo de esta trabajo de tesis fue visto como una mejora al proceso, ya que por leyes físicas irrefutables, con menor cantidad de carbón se podría generar la misma energía, lo que se puede describir en la siguiente ecuación de calor.

<p>Calor requerido por la caldera: $Q=mc \times PCI$ [Kcal] Donde: mc es masa en Kg y PCI es Poder Calorífico Inferior en Kcal/Kg</p>
--

Fuente: (Grupo Endesa, 2002)

Con ello se puede aclarar que para obtener el mismo calor, aumentando el poder calorífico, implica una disminución de la cantidad o masa de carbón necesaria.

Con lo anterior y de acuerdo a lo observado en cuanto a la alta variabilidad que presentan los resultados obtenidos, se propone efectuar una etapa de análisis para evaluar la variabilidad que aporta cada proveedor al resultado de este parámetro y con ello validar la hipótesis de afectación de este parámetro en las iniciativas propuestas por este trabajo de tesis.

Por último para concluir el análisis de los resultados de los parámetros de poder calorífico e índice hinchamiento, ya que ambos están correlacionados al igual que el nivel de porcentaje de ceniza. Es importante indicar que si bien el carbón consumido actualmente es de mayor poder calorífico al especificado por las calderas de las unidades N°3, N°4 y N°5 y por tanto es más caro, esto se podría contrarrestar con otros beneficios operativos, ya que se requiere de menor cantidad para lograr la misma generación que un carbón de menor poder calorífico (mejor eficiencia) y que a su vez de la combustión se obtiene menor cantidad de ceniza (menor exigencia de máquinas y costos de manejo de patio) y emisiones por tanto se garantiza el cumplimiento de las exigencias normativas medioambientales.

Si consideramos lo indicado anteriormente, respecto a nuestro propósito de evaluar la implementación de la iniciativa que comprende efectuar mezclas de carbón para bajar el costo de la tonelada de carbón combustible y a su vez mejorar la eficiencia en el consumo de las unidades de la central “Ejemplo”. También se debe analizar las dificultades de implementación a modo de lograr cuantificar los potenciales beneficios e impactos en la eficiencia los que se deben complementar con los resultados que se obtengan producto de la etapa de mejora.

A continuación se muestra un diagrama de “Causa-Efecto” desarrollado para la central a modo de evaluar las afectaciones positivas y negativas que podrían generarse con la utilización de mezclas de carbón.

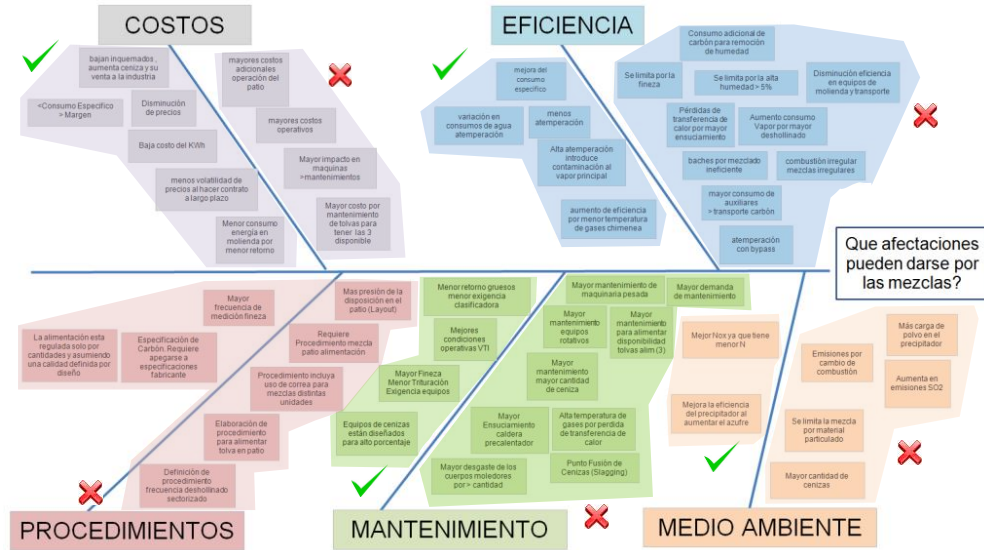


Figura N° 60. Diagrama de Espina de Pescado para aplicación de mezclas de carbón en la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

Tabla N° 30. Tabulación de los efectos que conlleva la aplicación de mezclas de carbón.

Iniciativa: Utilización de mezclas de carbón para la generación en Central Ejemplo			
Se considera: El resultado de la mezcla de carbonos respecto al carbón utilizado actualmente disminuirá el precio de inventario, disminuirá el poder calorífico ponderado (más apegado a la especificación de calderas), por tanto aumentará la cantidad de carbón a consumir, disminuirá el FSI ponderado y aumentará el porcentaje de ceniza ponderado.			
Afectación en	Efecto Positivo	Efecto Negativo	Mitigación
Eficiencia	Disminución de pérdidas por inquemados por mejora en al combustión al reducir el ponderado de Índice de Hinchamiento (FSI).	Pérdidas de transferencia de calor por mayor ensuciamiento de caldera (mayor ceniza presente en la mezcla)	Aumentar frecuencia de deshoollado
	Menor temperatura de gases chimenea, por menor poder calorífico del carbón	Alta fineza del residuo utilizado en la mezcla, sumado a la humedad producto del efecto de la lluvia sobre la pila acopiada a la intemperie limitan la ejecución de mezclas ya que en estas condiciones la mezcla resultante se atasca en los ductos durante la molienda.	Construir techo que cubra parte del residuo utilizado en la mezcla y así evitar que este se humedezca
	Reducción de atemperación y sus efectos positivos sobre la producción de vapor y consumo de auxiliares (menor utilización de bombas de agua-circulación), por menor poder calorífico del carbón	Pérdidas en consumo específico por mayor generación de vapor por mayor deshoollado y mayor consumo de auxiliares debido a la mayor cantidad de carbón que se requiere para generar.	-
	Menor consumo de energía por menor utilización de equipo de molienda (menor retorno debido a mayor fineza de la mezcla).	-	-
Costos	Mejor calidad de vapor principal, lo que poder hacer posible disminuir las purgas y sus efectos positivos sobre sobre la producción de vapor y consumo de auxiliares (vapor de atemperación es de menor calidad por tanto introduce impurezas)	-	-
	Aumenta el margen o ingresos debido a la mejor cobertura de contratos por menor costo variable de las unidades	Mayores costos en operación de patios de carbón y ceniza debido a la mayor cantidad que se tendría de almacenar. (Disminución de poder calorífico de la mezcla implica más cantidad de carbón para generar lo mismo y mayor porcentaje de ceniza)	-
	Aumento de ceniza con menor porcentaje de inquemado, puede ser vendida a mejor precio a la industria cementera	Al aumentar la cantidad de carbón requerida, se tienen mayores costos de mantenimiento por mayor utilización de molinos, deshoollado, correas, etc. Además se requiere mayor mantenimiento de tolvas de alimentación debido a que se le dará un mayor uso y se requiere una mayor confiabilidad, para poder ejecutar las mezclas.	Revisar planes de mantenimiento en tipo de actividad y frecuencias.
	Mejora en el margen por menor consumo específico debido a las mejoras en eficiencia descritas anteriormente en ese apartado Si se logra especificar el tipo de carbón requerido y se logra incluir en contratos de compra, se tiene una menor volatilidad de los precios	-	-

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida durante aplicación práctica de la herramientas de mejora de procesos, durante el desarrollo de esta tesis en la central Ejemplo.

Tabla N° 31. Continuación de tabulación de los efectos que conlleva la aplicación de mezclas de carbón.

Afectación en	Efecto Positivo	Efecto Negativo	Mitigación
Medio Ambiente	Mejor Nox ya que la mezcla tiene menor N	Aumento de material particulado por mayor porcentaje de ceniza de la mezcla. Esto limita la utilización de mezclas ya que se debe cumplir con las exigencias normativa	En la condición actual, las mezclas pueden ser utilizadas en las unidades 4 y 5, en las que se cuenta con una holgura en los precipitadores, la unidad N°3 el precipitador se encuentra en limite
	Mejora la eficiencia del precipitador al aumentar el azufre en la mezcla	Más carga de polvo en el precipitador al aumentar la ceniza de la mezcla Aumento de emisiones de SO2	Los precipitadores de las unidades 3, 4 y 5 están diseñados para un porcentaje de ceniza alto (24.5%). -
Mantenimiento	Mayor fineza de la mezcla, ocasiona menor retorno gruesos y con esto menor exigencia clasificadora	Mayor mantenimiento de equipos rotativos de molienda (Mayor desgaste de cuerpos molidores por mayor cantidad de carbón)	Revisar planes de mantenimiento en tipo de actividad y frecuencias.
	Mayor fineza de la mezcla, resulta en menor exigencia de trituración de equipos molidores.	Mayor mantenimiento para aumentar disponibilidad y confiabilidad de tolvas alimentación. Mayor mantenimiento a equipos de extracción de ceniza	Revisar planes de mantenimiento en tipo de actividad y frecuencias. -
Métodos - Procedimientos		Se requiere especificar el carbón necesario para cumplir con regulación medio ambiental, no desmejorar la eficiencia y encontrar un precio de compra optimo, para cada unidad (Buscar un punto de equilibrio entre la situación actual y las especificaciones de fabrica para cada caldera)	-
	Mezcla ejecutada dentro de la central, permite tomar acciones inmediatas correctivas durante la generación, actuando sobre los porcentajes de proporción de mezcla y los tipo de carbón, para lograr el resultado óptimo.	Se requiere decidir si la mezcla se compra lista o si se ejecuta en la central comprando las cantidades optimas del carbón disponible en el mercado que permita generar la mezcla. La compra de la mezcla fuera de la central ahorraría de mayores movimientos entre tolvas y pilas de acopio, pero no se podría controlar los resultados en caso de que estos no sean favorables (se consumiría tal como llega la mezcla sin poder modificar los resultados a menos que se hagan mezclas dentro de la central)	-
		Se requiere elaborar procedimiento operativo, para el manejo de patio para ejecutar mezclas (Distancias en tre pilas y tolvas, acopio FIFO el primer carbón que llega es el primer carbón en consumir, cantidad de maquinas para alimentar tolvas, etc)	-
		Se requiere elaborar procedimiento operativo, para efectuar mezclas utilizando tolvas de alimentación (regulación de cantidad de salida) y correas transportadoras (restricciones para cuando se requieren distintos tipos de mezclas para distintas unidades en servicio)	-
		Se requiere elaborar modelo matemático para ingresar parámetros de carbonos disponibles y obtener como resultado el porcentaje de mezcla optimo a realizar.	-

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida durante aplicación práctica de la herramientas de mejora de procesos, durante el desarrollo de esta tesis en la central Ejemplo.

Los aportes anteriores de los expertos luego fueron cuantificados para poder obtener una cifra potencial del beneficio económico para esta iniciativa.

6.5 Medición de la capacidad actual del proceso para el Costo Unitario del Carbón (Y1).

Análisis efectuado por los autores de esta tesis durante el mes de Mayo de 2013.

Para la iniciativas Y1, con el objetivo trazado en la etapa definir del presente trabajo que se muestra en la siguiente gráfica, donde se ha incorporado el límite superior de especificación la que fue definido como el mayor precio contratado actualmente para 7000 kcal/Kg, requerido para la caldera de la unidad N°2 e igual a 147.837 COP/Ton para el 1° Semestre 2013 (Proveedor N°1650).

A continuación se muestra el histograma de distribución de precios ponderados mensuales reliquidados para los distintos proveedores durante el 1° Semestre de 2013 y el cálculo de capacidad de proceso actual para datos no normales, utilizando el objetivo y límites de calidad definidos.

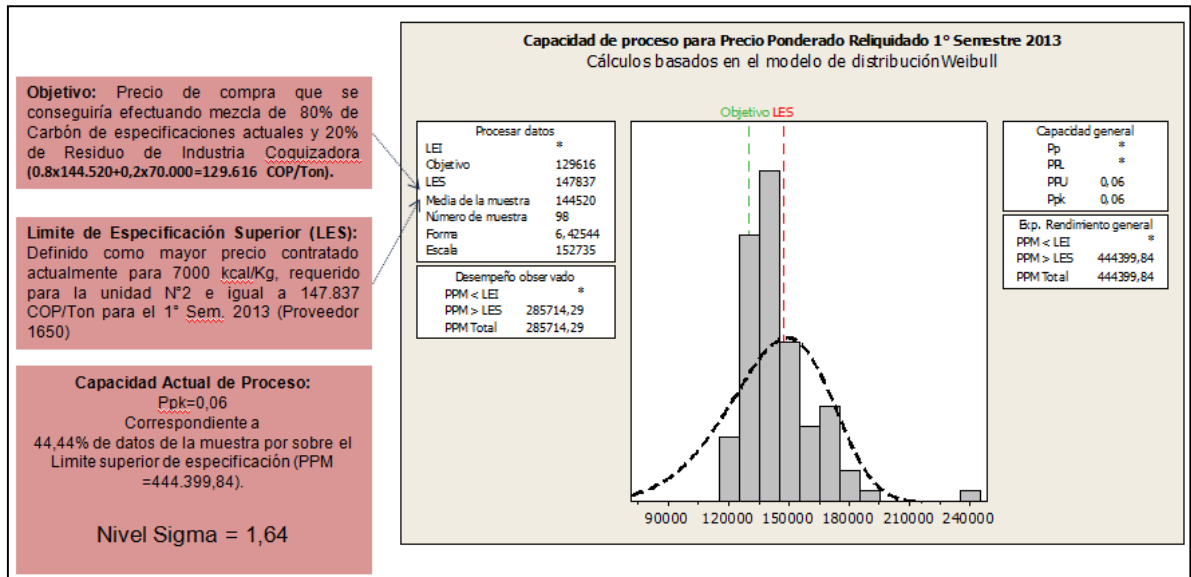


Figura N° 61. Capacidad de proceso para el Precio Ponderado del Carbón de ingreso a la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

Capacidad de proceso del Consumo Específico de carbón en las unidades de generación (Y2).

Análisis efectuado por los autores de esta tesis durante el mes de Mayo de 2013.

Para obtener la capacidad de proceso del indicador definido necesariamente debemos calcularlo para cada una de las unidades de generación por separado, ya que éstas son en realidad centrales de generación distintas.

A continuación se presentan las capacidades de proceso de cada una de las unidades definiendo límites de especificación superior igual a +2 desviaciones estándar sobre el valor de referencia, limite especificación inferior igual a -2 desviaciones estándar bajo el valor de y objetivo igual a -0,5% el valor de referencia a plena carga, tomando como valor de referencia el valor a plena carga obtenido de la última prueba de Heat Rate del 2012.

Unidad N°2.

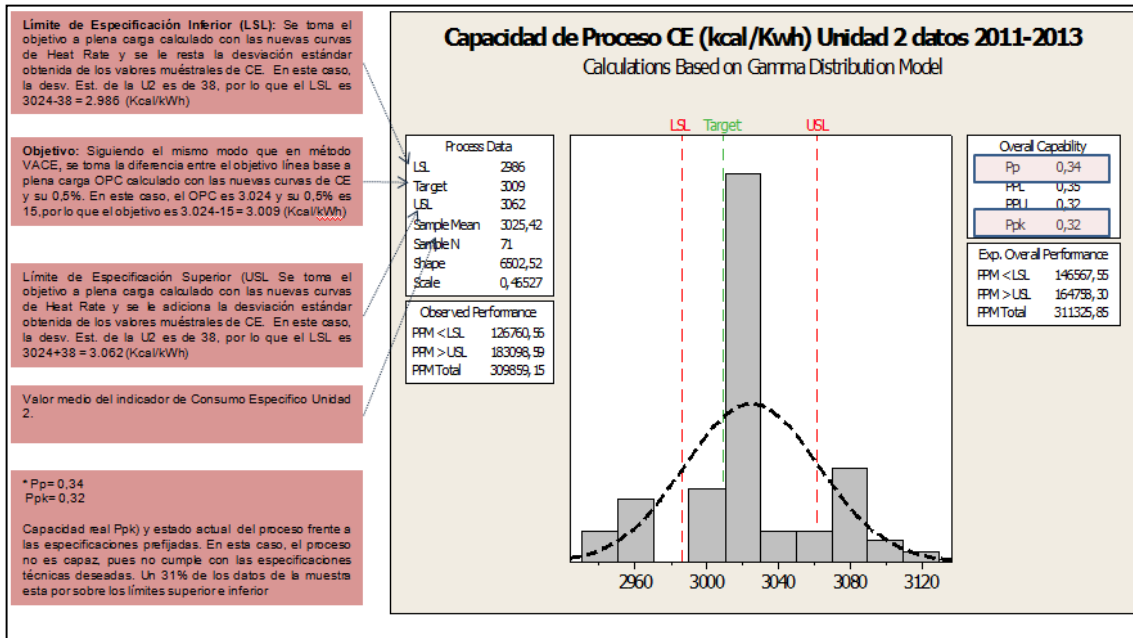


Figura N° 62. Capacidad de proceso para el Consumo Especifico de la Unidad N°2 de la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

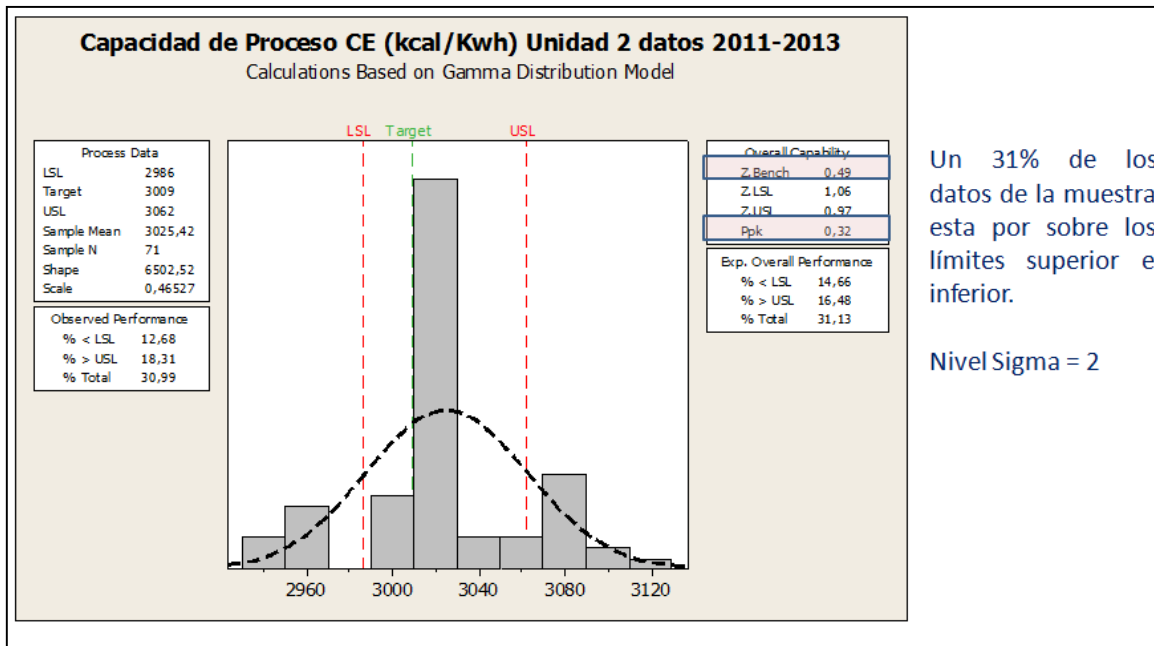


Figura N° 63. Capacidad de proceso para el Consumo Especifico de la Unidad N°2 de la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

Unidad N°3.

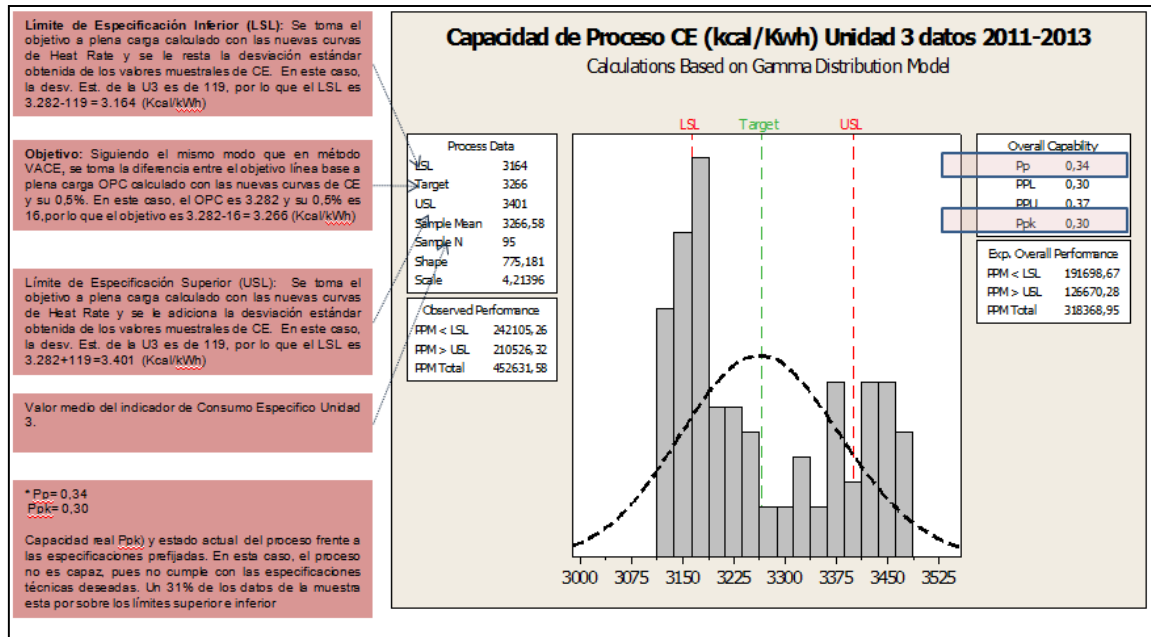


Figura N° 64. Capacidad de proceso para el Consumo Especifico de la Unidad N°3 de la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

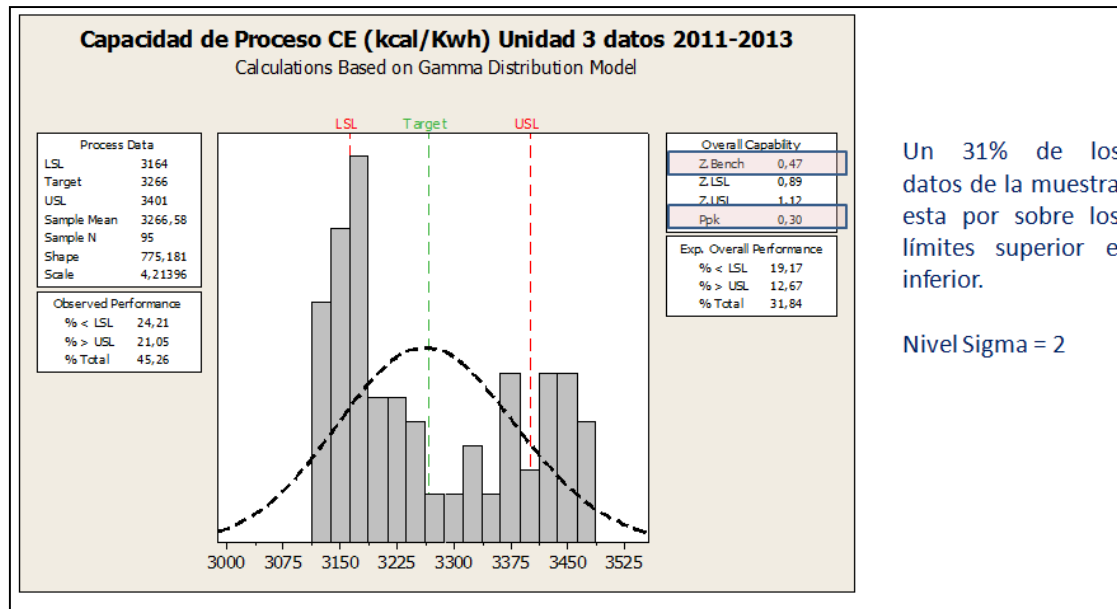


Figura N° 65. Capacidad de proceso para el Consumo Especifico de la Unidad N°3 de la central “Ejemplo”. (Elaboración propia, 2014)

Unidad N°4.

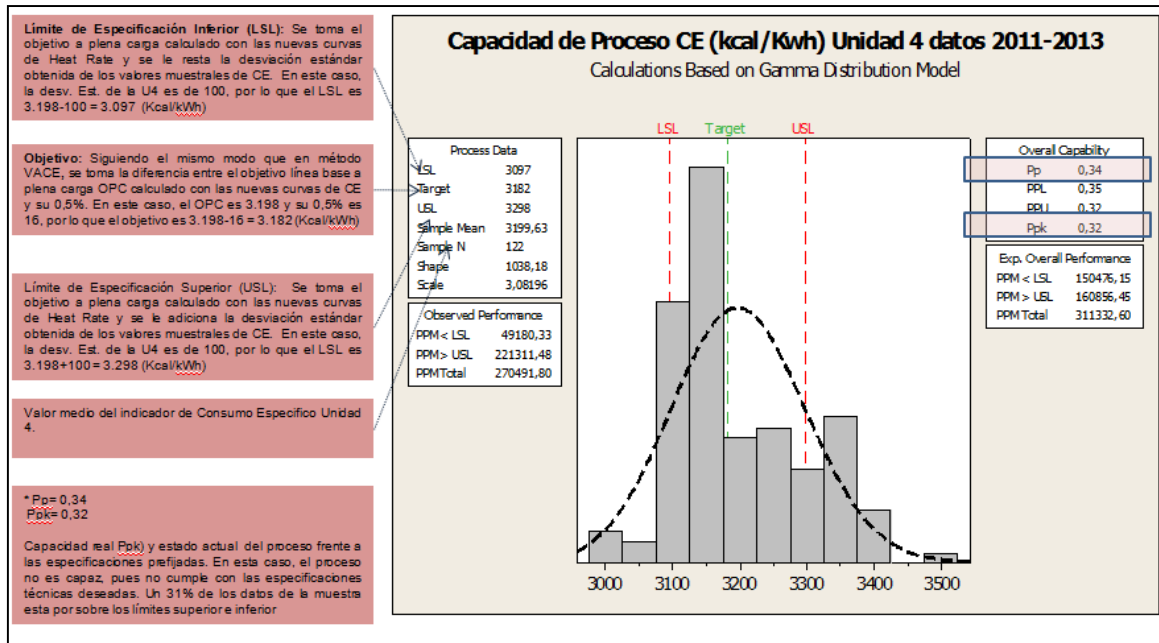


Figura N° 66. Capacidad de proceso para el Consumo Especifico de la Unidad N4 de la central Ejemplo (Elaboración propia, 2014)

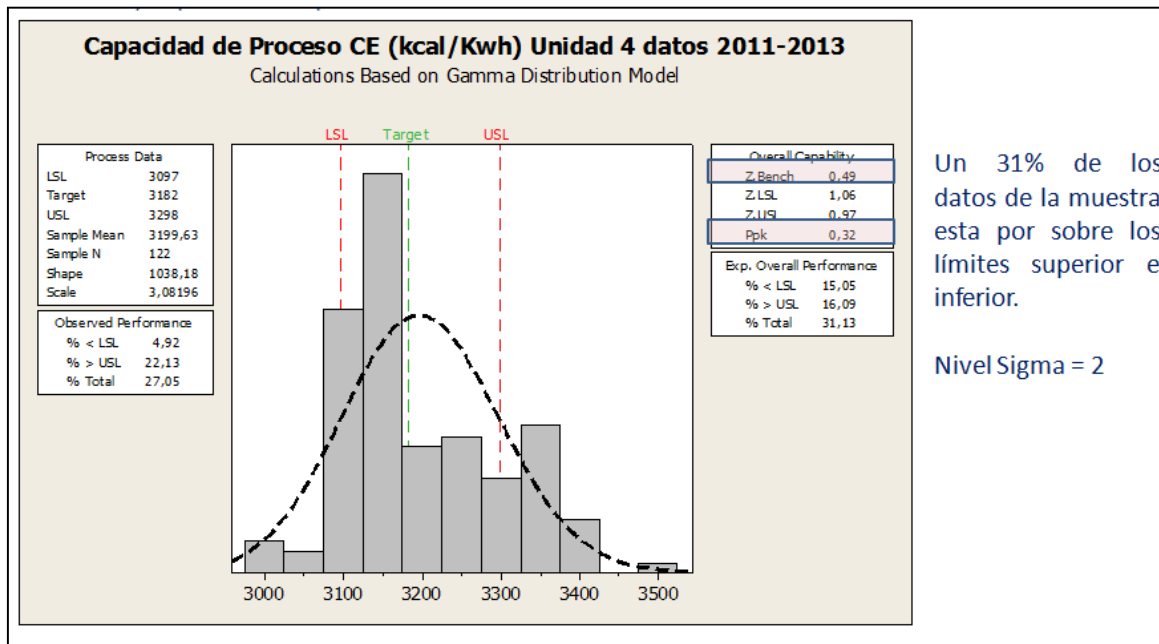


Figura N° 67. Capacidad de proceso para el Consumo Especifico de la Unidad N4 de la central Ejemplo (Elaboración propia, 2014)

Unidad N°5.

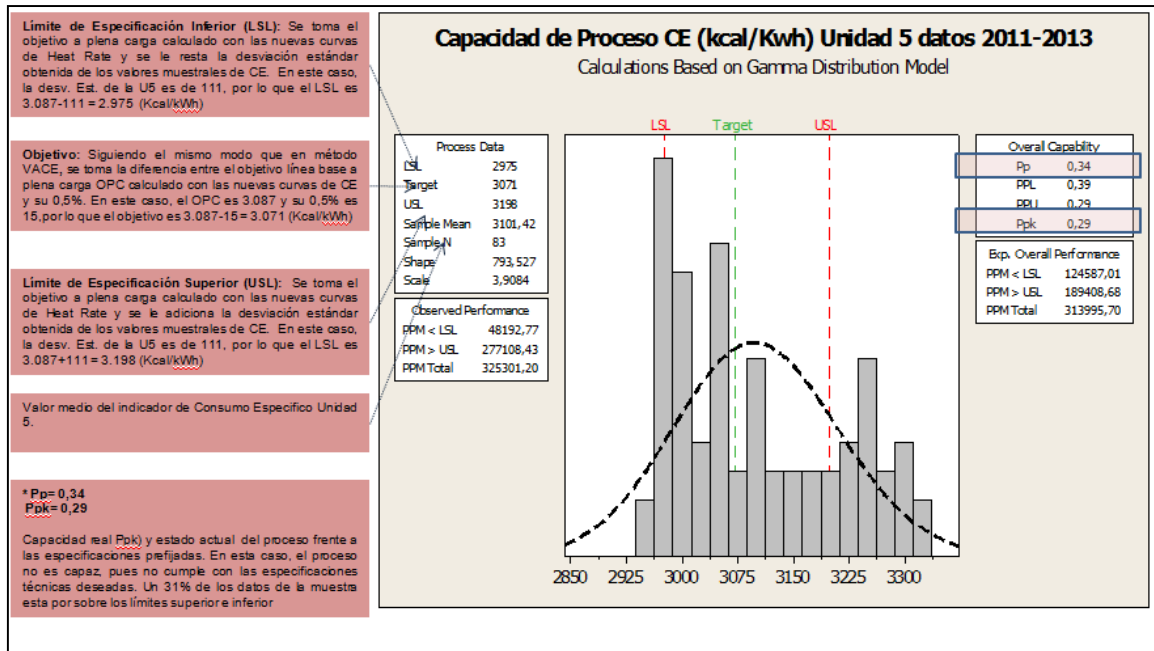


Figura N° 68. Capacidad de proceso para el Consumo Especifico de la Unidad N°5 de la central Ejemplo (Elaboración propia, 2014)

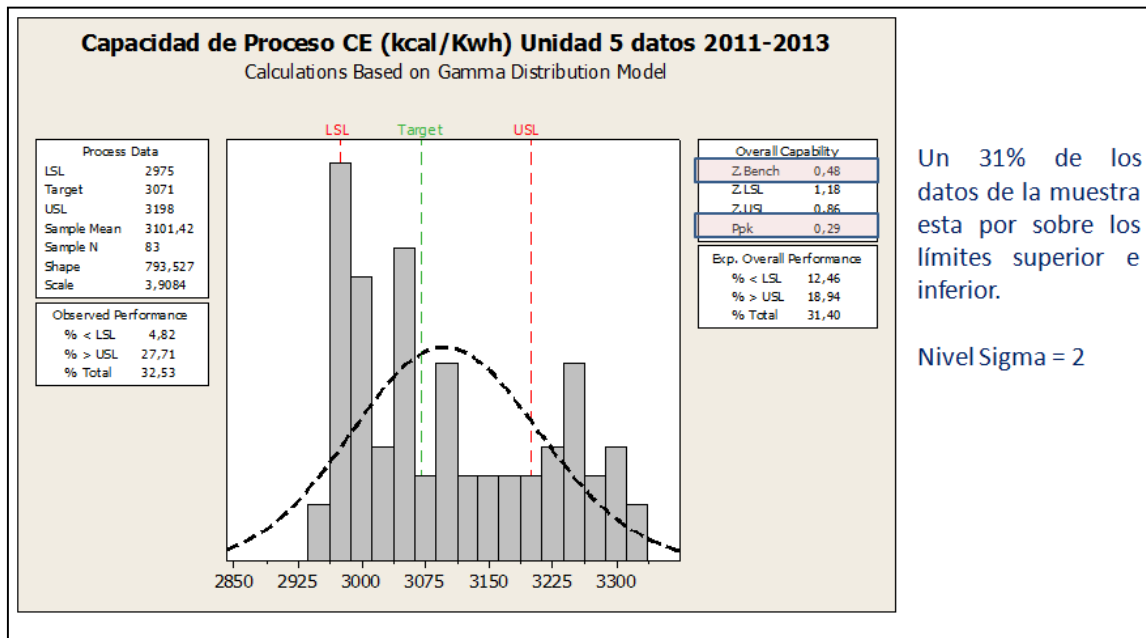


Figura N° 69. Capacidad de proceso para el Consumo Especifico de la Unidad N°5 de la central Ejemplo (Elaboración propia, 2014)

Resumen de capacidad de proceso de cada una de las unidades de generación de la central “Ejemplo”.

De acuerdo a lo indicado en la etapa “Definir” en el ítem 5.4.5 de esta tesis, dado a que no se cuenta con un valor estándar definido para la variación máxima del consumo específico en centrales térmicas convencionales y con base a los resultados que se esperan tener del proyecto, se asumió que la capacidad actual del proceso es de 2 sigmas. Lo anterior considerando que el valor medio de los datos históricos, coincide prácticamente con el valor de referencia obtenido de la prueba de “Heat Rate” del 2012.

Tabla N° 32. Resumen de índices de capacidad de proceso para el consumo específico de la central “Ejemplo”.

UNIDAD	LSL	USL	VALOR MEDIO CONSUMO ESPECÍFICO Datos 2011-2013	OBJETIVO PLENA CARGA (NUEVA LINEA BASE)	OBJETIVO PROYECTO	% FUERA DE ESPECIFICACIÓN	CAPACIDAD PROCESO	NIVEL SIGMA
							Ppk	
2	2.986	3.062	3.025	3.024	3.009	31%	0,32	1,99
3	3.164	3.401	3.267	3.282	3.266	32%	0,30	1,97
4	3.097	3.298	3.200	3.198	3.182	31%	0,32	1,99
5	2.975	3.198	3.101	3.087	3.071	31%	0,29	1,98

Fuente: Elaboración propia en base a información resultante de análisis de capacidad de proceso para el consumo específico del carbón de la central “Ejemplo”.

7 Desarrollo del trabajo - Etapa Analizar.

7.1 Planteamiento y resolución de hipótesis. (El factor no impacta en la Y v/s el factor si impacta significativamente en la Y)

7.1.1 Análisis de los datos.

Características de variables en análisis.

Tabla N°33. Clasificación de las variables a analizar.

Nombre de la Variable	Sigla	Unidad	Tipo de Variable
Porcentaje de Inquemados de carbón en la combustión	% Inquemados	%	Continua
Consumo Especifico de las unidades de generación	CE	kcal/kWh	Continua
Poder Calorifico Superior del Carbón	HHV Carbón	kcal/kg	Continua
Poder Calorifico Superior especificado por cada caldera	HHV Esp	kcal/kg	Dato Continuo
Precio unitario de Compra del Carbón	P	Cop/Ton	Continua
Porcentaje de Ceniza contenida en el carbón de compra	Cz	%	Continua
Índice de hinchamiento libre del carbón de compra	FSI	Sin unidad	Continua
Granulometría del carbón de consumo en previo a la combustión	Fineza	micras	Continua

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos en el capítulo 6 de esta tesis.

7.1.2 Planteamiento y Resolución de Hipótesis.

Para los datos representativos y recogidos mostrados en la Figura N° 55 se plantea resolver la siguiente hipótesis.

“La calidad del carbón comprado es superior a las especificaciones de las calderas afectando el precio de compra”

- a) **Ho: Poder calorífico superior del carbón comprado no posee diferencia significativa con el poder calorífico del carbón especificado para cada una de las calderas.**

$$\mu \text{ HHV (Comprado)} = \text{HHV (Especificado U2)}$$

$$\mu \text{ HHV (Comprado)} = \text{HHV (Especificado U3, U4, U5)}$$

Ha: Poder calorífico superior del carbón comprado posee diferencia significativa con el poder calorífico del carbón especificado para cada una de las calderas

$$\mu \text{ HHV (Comprado)} \neq \text{HHV (Especificado U2)}$$

$$\mu \text{ HHV (Comprado)} \neq \text{HHV (Especificado U3, U4, U5)}$$

Test de hipótesis para la Unidad N°2.

Especificación de poder calorífico de la caldera: 7000 kcal/kg.

Se ha efectuado una prueba T para una muestra tomando los datos históricos mensuales y no quincenales de poder calorífico obteniendo el siguiente resultado.

Tabla N° 34. Prueba "T de una muestra" para el poder calorífico del carbón de ingreso de la central Ejemplo.

T de una muestra: Poder Calorífico Mensual					
Prueba de $\mu = 7000$ vs. $\mu \neq 7000$					
Variable	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95%
Poder Calorífico Mensual	336	6890,6	223,9	12,2	(6866,6; 6914,6)
Variable	T	P			
Poder Calorífico Mensual	-8,96	0,000			

Fuente: Elaboración propia utilizando software Minitab 16 en base a información recogida de informes mensuales de calidad del carbón. (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

Para la prueba anterior, el valor de $P < 0,05$ por tanto hay evidencia suficiente para rechazar H_0 , **demonstrado que el poder calorífico comprado no coincide con las especificaciones de la caldera de la unidad N°2, siendo este valor relativamente menor al requerido.**

Test de hipótesis para las Unidades N°3, N°4 y N°5.

Como estas unidades poseen idénticas características de diseño la especificación de poder calorífico de las calderas es: 6000 Kcal/kg

Efectuando la misma prueba anterior pero para la especificación de $\mu = 6000$ Kcal/kg, se obtuvo el siguiente resultado.

Tabla N° 35. Prueba "T de una muestra" para el poder calorífico del carbón de ingreso de la central "Ejemplo".

T de una muestra: Poder Calorífico Mensual					
Prueba de $\mu = 6000$ vs. $\mu \neq 6000$					
Variable	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95%
Poder Calorífico Mensual	336	6890,6	223,9	12,2	(6866,6; 6914,6)
Variable	T	P			
Poder Calorífico Mensual	72,91	0,000			

Fuente: Elaboración propia utilizando software Minitab 16 en base a información recogida de informes mensuales de calidad del carbón. (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

De la prueba anterior, el valor de $P < 0,05$ por tanto hay evidencia suficiente para rechazar H_0 , **demostrado que el poder calorífico comprado no coincide con las especificaciones de la caldera de la unidades N°3, 4 y 5, siendo este valor significativamente mayor al requerido.**

H_0 : El poder calorífico superior del carbón comprado no tiene efecto significativo con el precio de compra.

H_a : El poder calorífico superior del carbón comprado tiene efecto significativo con el precio de compra.

Para el análisis de esta hipótesis hay que indicar que el precio tiene distintas afectaciones tales como, el grado de cumplimiento de los proveedores con las cantidades pactadas mensualmente, así como también que se han identificado dispersiones producto de los pagos de bonos en meses diferidos y por último efectos del valor del dinero en el tiempo, dado que los precios son actualizados semestralmente por el IPC y no así los valores de poder calorífico. Por lo tanto es sabido que en caso de existir correlación entre estas variables, esta no será completa es decir el poder calorífico no explicará en un 100% el comportamiento del precio de la tonelada de carbón.

Para mitigar el efecto del valor del dinero en el tiempo se ha efectuado realizar una diferencia para cada uno de los datos entre el precio del valor liquidado y el valor del precio base para cada proveedor. Esto mismo se ha hecho entre el poder calorífico entregado y el poder calorífico contratado, de manera que el test de hipótesis consistirá en evaluar la correlación entre estas dos diferencias.

Otro aspecto a considerar en la decisión de mitigar consiste en revisar las dispersiones detectadas en los precios liquidados mensualmente, para lo que se decidió eliminar los datos donde se detectaron pagos diferidos y dispersiones importantes en proveedores, en el siguiente gráfico de línea se muestra los períodos de tiempo y proveedores que aportan a esta dispersión.

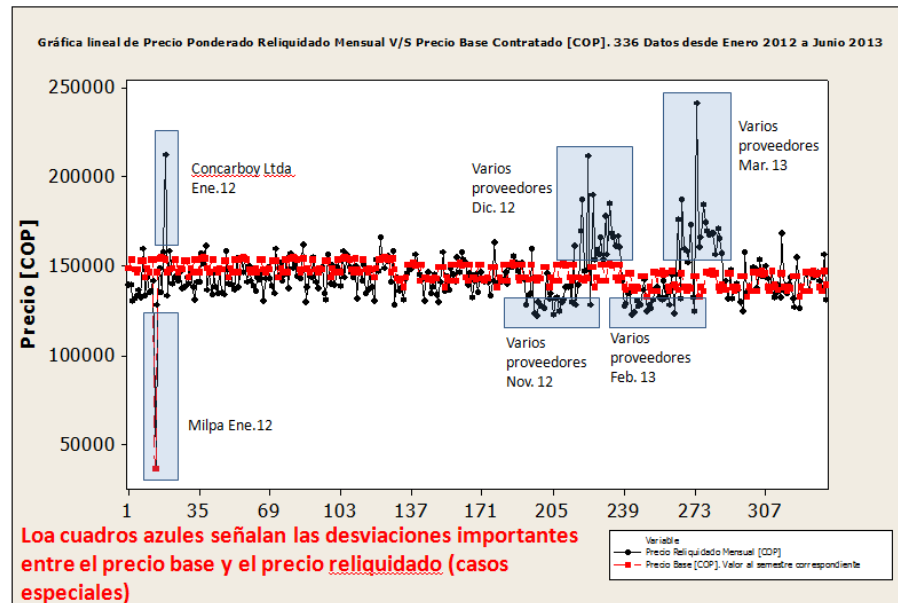


Figura N°70. Gráfico de dispersión de precios pagados a proveedores de carbón. (Elaboración propia, 2014)

Con los datos estratificados se procedió a graficar ambas variables Delta Precio vs Delta Poder Calorífico en una gráfico de dispersión con regresión lineal, con el propósito de visualizar gráficamente el grado de correlación entre ambas.

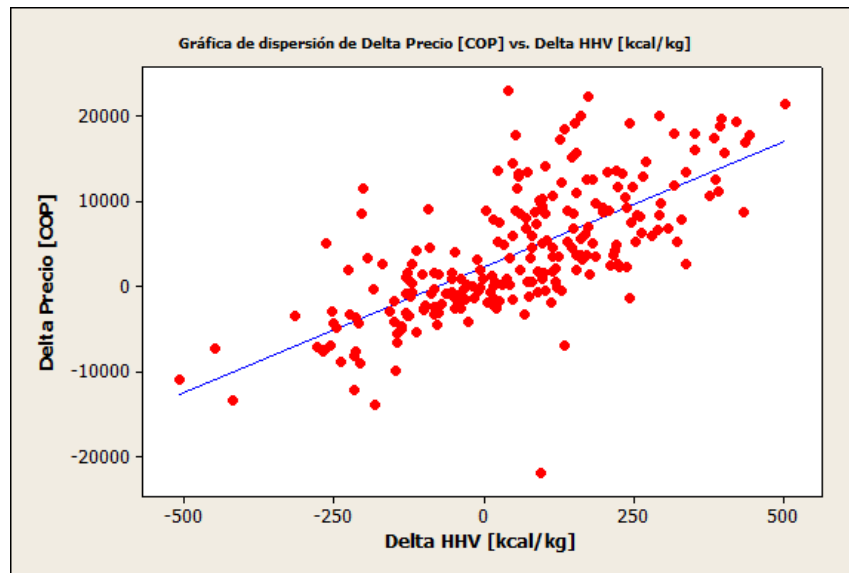


Figura N°71. Gráfica de dispersión para las variables Diferencia de Poder Calorífico Superior (HHV) y la Diferencia de Precio. (Elaboración propia, 2014)

La diferencia se establece entre valores reales respecto a los valores bases contratados.

En la gráfica de la Figura N°71 se puede observar que a mayor diferencia obtenida entre el poder calorífico contratado y el poder calorífico entregado por los proveedores, se obtiene una mayor diferencia en el precio de manera proporcional (diferencia positiva en HHV, implica Diferencia positiva en el Precio).

Efectuando un análisis de regresión lineal entre Delta Precio y Delta HHV del gráfico se obtuvo el siguiente resultado.

Tabla N° 36. Análisis de Regresión entre Delta Precio y Delta Poder Calorífico

Análisis de regresión: Delta Precio [COP] vs. Delta HHV						
La ecuación de regresión es						
Delta Precio [COP] = 2355 + 29,5 Delta HHV						
Predictor	Coef	SE Coef	T	P		
Constante	2354,7	366,5	6,42	0,000		
Delta HHV	29,510	1,942	15,20	0,000		
S = 5425,63 R-cuad. = 49,4% R-cuad. (ajustado) = 49,1%						
Análisis de varianza						
Fuente	GL	SC	MC	F	P	
Regresión	1	6798495451	6798495451	230,95	0,000	
Error residual	237	6976685245	29437490			
Total	238	13775180696				
Observaciones poco comunes						
Obs	Delta HHV	Delta Precio [COP]	Ajuste	EE de ajuste	Residuo	Residuo estándar
3	41	23161	3568	352	19593	3,62R
8	-448	-7256	-10879	1038	3623	0,68 X
12	53	17888	3906	351	13981	2,58R
13	-201	11640	-3589	608	15229	2,82R
14	134	18535	6299	383	12236	2,26R
16	151	19279	6816	398	12463	2,30R
19	-509	-11006	-12679	1150	1673	0,32 X

Fuente: Elaboración propia utilizando software Minitab 16 en base a información recogida de informes mensuales de calidad del carbón. (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

A la luz de los resultados de R cuadrado podemos decir que la variación del poder calorífico explica la variación del 50% del precio, situación que para nuestro análisis es suficiente como para rechazar la H_0 aunque $P < 0,05$, según lo explicado en el párrafo anterior y **podemos indicar que el Poder calorífico tiene un efecto significativo en el precio liquidado a los proveedores, por tanto en el costo variable unitario del combustible podemos asegurar que al aumento del poder calorífico el precio también aumenta.**

H_0 : El porcentaje de ceniza del carbón comprado no tiene efecto significativo con el precio de compra.

H_a : El porcentaje de ceniza del carbón comprado tiene efecto significativo con el precio de compra.

Siguiendo los mismos pasos que la hipótesis anterior se procedió a graficar ambas variables Delta Precio y Delta % de ceniza en una gráfica de dispersión con regresión lineal, con el propósito de visualizar gráficamente el grado de correlación entre ambas.

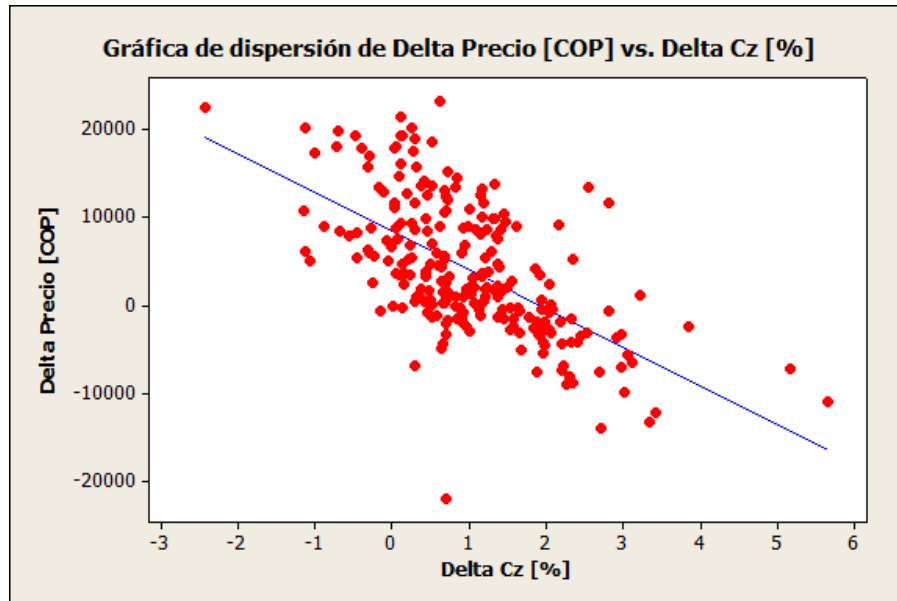


Figura N° 72. Gráfica de dispersión para las variables Diferencia del Porcentaje de Ceniza (% Cz) y la Diferencia de Precio. (Elaboración propia, 2014)

La diferencia se establece entre valores reales respecto a los valores bases contratados.

Del gráfico de la figura N° 72 podemos observar que a mayor diferencia obtenida entre el % de ceniza contratado y el % de ceniza entregado por los proveedores se obtiene una menor diferencia en el precio de manera indirectamente proporcional (diferencia positiva en % Ceniza, implica diferencia negativa en el Precio liquidado).

Se efectúa el análisis de regresión entre Delta Precio y Delta % de Ceniza donde se obtuvo el siguiente resultado.

Tabla N° 37. Análisis de regresión para las variables Delta Precio y Delta Porcentaje de Ceniza.

Análisis de regresión: Delta Precio [COP] vs. Delta Cz						
La ecuación de regresión es						
Delta Precio [COP] = 8398 - 4423 Delta Cz						
Predictor	Coef	SE Coef	T	P		
Constante	8398,3	541,1	15,52	0,000		
Delta Cz	-4422,6	373,1	-11,85	0,000		
S = 6040,74 R-cuad. = 37,2% R-cuad. (ajustado) = 37,0%						
Análisis de varianza						
Fuente	GL	SC	MC	F	P	
Regresión	1	5126921622	5126921622	140,50	0,000	
Error residual	237	8648259074	36490545			
Total	238	13775180696				
Observaciones poco comunes						
Obs	Delta Cz	Delta Precio [COP]	EE de Ajuste	EE de ajuste	Residuo	Residuo estándar
3	0,62	23161	5656	416	17505	2,90R
7	0,24	20178	7317	482	12861	2,14R
8	5,17	-7256	-14451	1602	7195	1,24 X
13	2,80	11640	-3985	776	15626	2,61R
14	0,52	18535	6117	431	12418	2,06R
19	5,65	-11006	-16589	1777	5584	0,97 X
31	-2,43	22431	19167	1341	3264	0,55 X

Fuente: Elaboración propia utilizando software Minitab 16 en base a información recogida de informes mensuales de calidad del carbón. (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

Del resultado de R cuadrado podemos decir que la variación del porcentaje de Ceniza explica la variación del 37% del precio, situación que para nuestro análisis es suficiente para rechazar la H_0 aunque $P < 0,05$, dado a lo explicado respecto a los diferentes factores que influyen en el resultado del precio liquidado y **podemos indicar que el % de Ceniza si tiene un efecto significativo en el precio liquidado a los proveedores, aunque en un grado menor que el poder calorífico, por lo tanto el costo variable unitario del combustible asegura el aumento el porcentaje de Ceniza que disminuirá el precio liquidado.**

H_0 : El Índice de Hinchamiento Libre (FSI) del carbón comprado no tiene efecto significativo en el poder calorífico y correlativamente en el precio de compra.

H_a : El Índice de Hinchamiento Libre (FSI) del carbón comprado tiene efecto significativo en el poder calorífico y correlativamente en el precio de compra.

Con los mismos datos de la liquidaciones, usados para resolver las hipótesis anteriores, se procedió a estratificar los datos de manera de hacer coincidir los meses con datos

disponibles de Índice de hinchamiento con los de poder calorífico, para luego proceder a graficar ambas variables HHV y FSI en una gráfica de dispersión con regresión, con el propósito de visualizar gráficamente el grado de correlación entre ambas.

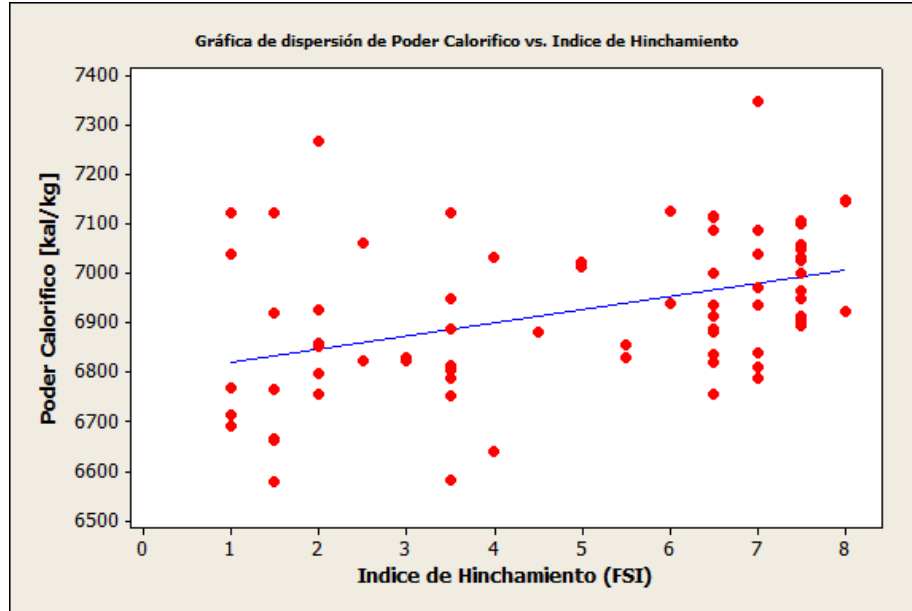


Figura N° 80. Gráfico de dispersión para el Poder Calorífico y el Índice de Hinchamiento. (Elaboración propia, 2014)

Del gráfico anterior podemos observar que existe una alta variabilidad de poder calorífico para un mismo índice de hinchamiento, aunque se observa una tendencia directamente proporcional entre el Índice de Hinchamiento y el Poder Calorífico.

Para comprender mejor los datos sabemos que los carbones bituminosos de tipo térmicos deben tener un valor inferior o igual a 3,5 de Índice de Hinchamiento para ello hemos agrupado los datos de la siguiente forma.

Tabla N° 38. Agrupamiento de los datos usando valores promedios en distintos rangos de Índice de Hinchamiento y Poder Calorífico Superior HHV.

Promedio Índice de Hinchamiento para datos FSI <= 3,5	Promedio Índice de Hinchamiento para el total de datos	Promedio Índice de Hinchamiento para datos FSI > 3,5	Promedio HHV para carbones cuyo FSI <= 3,5 [Kcal/kg]	Promedio HHV para el total de datos [Kcal/kg]	Promedio HHV para carbones cuyo FSI > 3,5 [Kcal/kg]
2,24137931	5,0	6,706521739	6852,92462	6926	6972,184505

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de informes mensuales de calidad del carbón. (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

Los resultados anteriores pueden ser ordenados en la siguiente tabla según se indica.

Tabla N° 39. Promedios de Valores para Índice de Hinchamiento (FSI) y Poder Calorífico Superior (HHV).

FSI	HHV
2,24	6852,92
4,98	6926,07
6,71	6972,18

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de informes mensuales de calidad del carbón. (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

Con los datos anteriores se procedió nuevamente a graficar ambas variables HHV y FSI en una gráfica de dispersión con regresión lineal, con el propósito de visualizar gráficamente el grado de correlación entre ambas.

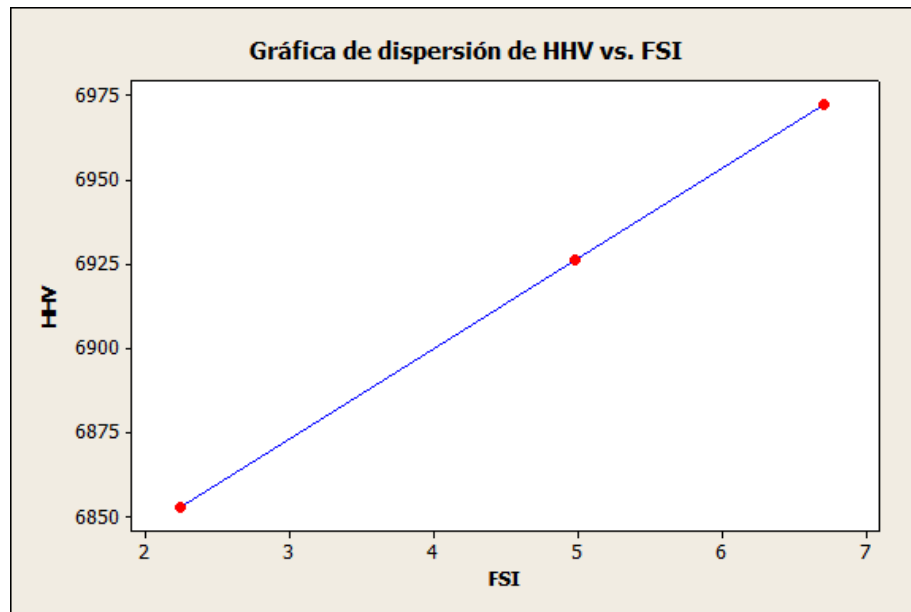


Figura N° 73. Gráfica de correlación entre Índice de Hinchamiento (FSI) y Poder Calorífico (HHV). (Elaboración propia, 2014)

De la gráfica anterior podemos observar que existe una relación directamente proporcional entre el Índice de Hinchamiento y el Poder Calorífico entregado por los proveedores.

Efectuando el análisis de regresión entre los promedios de datos usados en la gráfica anterior para HHV y FSI, se obtuvo el siguiente resultado.

Tabla N° 40. Análisis de Regresión para el Poder Calorífico Superior (HHV) y el Índice de Hinchamiento.

Análisis de regresión: HHV vs. FSI					
La ecuación de regresión es					
HHV = 6793 + 26,7 FSI					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constante	6793,06	0,00	*	*	
FSI	26,7091	0,0000	*	*	
S = 0 R-cuad. = 100,0% R-cuad. (ajustado) = 100,0%					
Análisis de varianza					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	7233,3	7233,3	*	*
Error residual	1	0,0	0,0		
Total	2	7233,3			

Fuente: Elaboración propia utilizando software Minitab 16 en base a información recogida de informes mensuales de calidad del carbón. (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

Del resultado de R cuadrado podemos indicar que existe suficiente evidencia para rechazar el valor de H_0 e indicar que el índice de Hinchamiento FSI si tiene una afectación significativa sobre el Poder Calorífico suministrado por los proveedores y de acuerdo a los resultados también tiene afectación sobre el Precio Liquidado a los proveedores y por tanto sobre el Costo Variable Unitario del Combustible.

Para profundizar el análisis del comportamiento del FSI y proponer acciones de mejora y control a continuación mostraremos un diagrama de cajas para ver la variabilidad de los datos de Índice de Hinchamiento (FSI) el que fue elaborado con valores ponderados mensuales de cada proveedor, información de los datos entre los meses de Noviembre 2012, Febrero y Abril 2013.

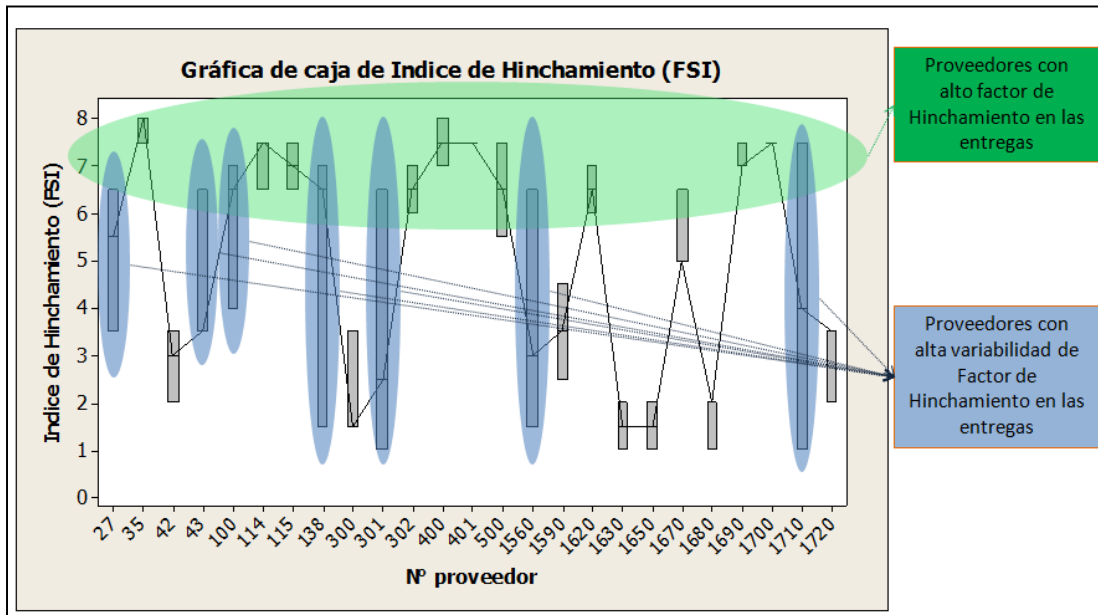


Figura N° 74. Gráficas de Caja para el análisis de variabilidad en el Índice de Hinchamiento de los distintitos proveedores. (Elaboración propia, 2014)

Del diagrama anterior podemos desglosar el siguiente listado de proveedores cuyos valores de Índice de hinchamiento afectan significativamente a los resultados del proceso con su respectivo aporte ponderado a la cantidad total de ingreso de carbón.

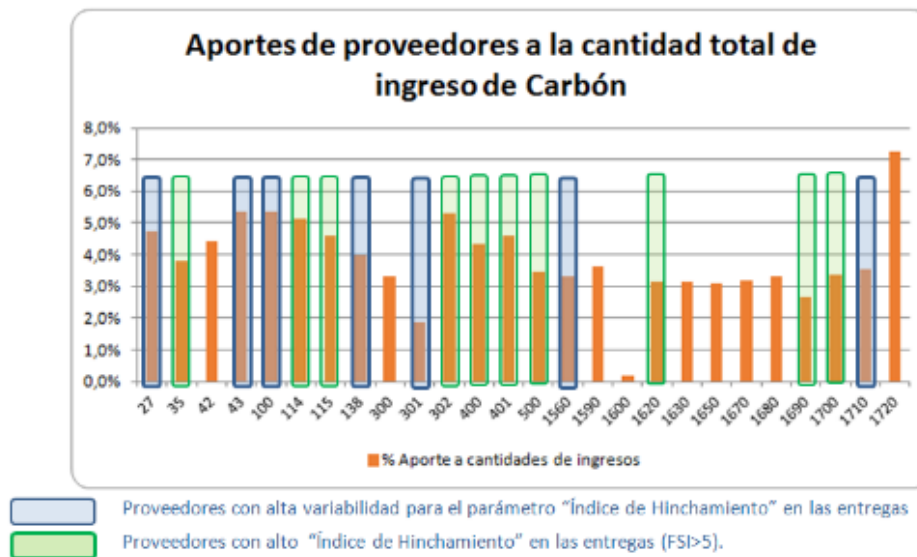


Figura N° 75. Porcentaje de aporte de carbón de ingreso para los distintitos proveedores. (Elaboración propia, 2014)

Tabla N° 41. Clasificación de proveedores respecto a la variabilidad y nivel de Índice de Hinchamiento en las entregas de Carbón a la Central Ejemplo.

N° Proveedor	Proveedor	N° Proveedor	Proveedor
27	Carbones San Fernando	500	Procarbon
35	Misael Castillo Castro	1560	Cooprotraboy Ltda
42	Cooprocarbon Sugamuxi	1590	Juan Hely Fajardo
43	Cooprocarbon Sugamuxi	1600	MILPA SA
100	Ricardo Mestizo Reyes	1620	Luis carlos garnica garnica
114	Mina Los nevados CIA Ltda	1630	Reinaldo lopez fernandez
115	Minminer S.A.	1650	Edgar Octavio Perez Vanegas
138	P3 Carbonera los pinos	1670	Sanoha Ltda
300	Cooperativa Agrominera Multiactiva	1680	Coincarboy Ltda
301	Cooperativa Agrominera Multiactiva	1690	Carboneras San Jose
302	Cooperativa Agrominera Multiactiva	1700	Domiciano Perez
400	Carbones del Gibraltar S.A.	1710	Dora Isabel Agudelo Estepa
401	Inversiones Pinzón Martinez S.A.	1720	Emprocoal A&V

Proveedores con alta variabilidad para el parámetro "Índice de Hinchamiento" en las entregas
 Proveedores con alto "Índice de Hinchamiento" en las entregas (FSI>5).

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de informes mensuales de calidad del carbón. (División Combustibles. Endesa Colombia, 2013)

Los carbones con alto valor de FSI o de tipo metalúrgico se encuentran en el rango superior en cuanto a clasificación según normas ASTM, es decir tienen un mayor poder calorífico como ya hemos visto en los test de hipótesis anteriores. Es por esto y de acuerdo a los observado en cuanto a la alta variabilidad que presentan los resultados de los proveedores que entregan en algunos meses carbón con bajo índice de hinchamiento y otros meses carbón con alto índice de hinchamiento. Este problema podría entenderse dado que este parámetro no está regulado en las bases contractuales vigentes en lo que respecta a la entrega de carbón (No es penalizado), ya que este tipo de carbones (con alto FSI) o su mezcla con carbones de menor poder calorífico les permitiría a los proveedores cumplir con la alta exigencia de poder calorífico que se exige contractualmente (6.900 Kcal/Kg).

Dado lo anterior y como se verá más adelante se propondrá modificar la condición contractual vigente, solicitando disminuir la exigencia contractual de poder calorífico para algunos proveedores, con el propósito de desincentivar que estos entreguen carbones con alto Índice de Hinchamiento, pero a su vez aumentando las cuotas para proveedores que presenten un mineral más adecuado a las necesidades de las unidades de generación, respecto al punto óptimo para cada caldera, el cual debe que debe ser obtenido como resultado del Diseño de Experimento DOE que se detallará en una etapa posterior de este trabajo.

Además se propondrá incluir restricciones para el ingreso de carbón con alto valores de Índice de Hinchamiento, tales como cláusulas contractuales que penalicen el incumplimiento.

7.2 Selección de variables vitales (x's)

Del análisis anterior, tenemos las siguientes variables críticas a controlar.

Y1. Reducción del costo variable unitario del combustible utilizando mezclas de carbón.

- a) Índice de Hinchamiento del Carbón de Consumo. El cual depende de la calidad del carbón de ingreso a la central y de la regulación contractual de compra a los distintos proveedores.
- b) Poder Calorífico del Carbón de Consumo. El cual depende de la Gestión de Mezclas de Carbones y su grado de apego al punto óptimo a determinar para cada caldera.
- c) Porcentaje de ceniza del carbón de consumo. La cual está directamente relacionada con el poder calorífico (relación indirectamente proporcional) y con el material particulado de las emisiones medioambientales (relación directamente proporcional).

Variables restrictivas para esta iniciativa son:

- d) Material Particulado en las emisiones medioambientales (<100 mg/m³).
- e) Grado de Humedad del Carbón de Consumo (<7,5 % de humedad total)

Y2. Reducción del costo variable unitario del combustible mejorando la eficiencia en el consumo de las unidades de generación.

Además de las anteriores que también aplican a esta iniciativa, se suman las siguientes variables críticas.

- a) Granulometría del carbón pulverizado, previo a la combustión. La cual depende del desempeño del proceso de molienda, con factores operacionales posibles de controlar, tales como, nivel de apertura de clasificadora de gruesos de carbón, cantidad y condición de cuerpos moledores.
- b) Porcentaje de Inquemados en la combustión del carbón. La cual depende de variables mencionadas anteriormente: Granulometría del carbón pulverizado y el Índice de Hinchamiento del carbón de consumo.
- c) Temperatura de Vapor Principal. La cual depende del control de los parámetros de combustión, tales como porcentajes de mezcla aire-carbón, para la regulación de la temperatura de la caldera.

Las siguientes variables, no están relacionadas con las características del carbón ni a la gestión del mismo en el proceso de combustión, pero si son variables que afectan a eficiencia de la central generadora.

- d) Presión del Condensador. Depende de la limpieza y estado de hermeticidad del condensador.

- e) Servicios Auxiliares consumidos por la central. Depende del diseño de la central y del grado de utilización de los equipos principales del proceso productivo, lo que puede ser gestionado y controlado con medidas operacionales.

8 Desarrollo del trabajo - Etapa Mejorar.

8.1 Encontrar el mejor modelo para determinar el impacto cuantitativo de cada x's.

Como se mencionó con anterioridad es necesario efectuar un estudio de diseño según de experimento DOE para encontrar el punto óptimo entre las características de calidad del combustible suministrado para los siguientes parámetros; Poder Calorífico Superior, Porcentaje de Ceniza, Índice de Hinchamiento, Granulometría, Porcentaje de Humedad Total, etc. y ver sus efectos sobre una variable de salida, que para nuestro caso corresponde al Consumo Específico.

Debido a la gran cantidad de factores y a la necesidad de efectuar un experimento completo que sea capaz de caracterizar el proceso y de obtener un modelo que permita determinar la combinación de factores más óptima para el proceso. Se decidió llevar a cabo un diseño de experimento de tipo factorial 2^k completo sin réplica con un punto central, cuyas etapas se describen a continuación de acuerdo a la teoría descrita en el punto 3.12.

8.1.1 Planteamiento del experimento.

Un aspecto importante a señalar en esta implantación de la etapa mejorar no fue parte de esta tesis, por lo que los datos mostrados en este capítulo fueron simulados utilizando valores similares a los resultados obtenidos en las pruebas de mezclas de carbón en la unidad de generación N°5, durante y como parte del desarrollo de este trabajo.

El objetivo del DOE que aplicaremos a la central “Ejemplo” consiste en determinar de manera cuantitativa el efecto que tiene el **Poder Calorífico Superior**, el **Porcentaje de Ceniza**, el **Índice de Hinchamiento**, la **Granulometría**, el **Porcentaje de Humedad** del carbón de consumo y todas las combinaciones posibles o interacciones entre los distintos factores sobre el **Consumo Específico** de la unidad de generación en la cual se ejecuta el experimento.

Para lo anterior y con el propósito de poder llevar a la práctica el experimento se decidió no incorporar como factores, pero si mantener constantes y en sus valores nominales las variables de control operacional de la etapa de combustión, correspondientes a Temperatura de la mezcla Aire-Carbón y Porcentajes en la mezcla Aire-Carbón. Por otro lado y con el propósito de no desarrollar otro experimento separado para otras variables de salida se decide medir en cada corrida de prueba del experimento, las variables relevantes de la etapa post combustión del carbón, tales como las relacionadas a las restricciones de cumplimiento de emisiones medioambientales, donde la variable más relevante en la central “Ejemplo” corresponde al Material Particulado y otras relacionadas a pérdidas en el proceso, donde tal como hemos visto en el desarrollo de este trabajo la variable más importante en la central “Ejemplo” corresponde al porcentaje de Inquemados.

Otro aspecto importante a señalar es que idealmente en cada unidad de generación se debió realizar un DOE con el mismo formato y diseño con el propósito de conocer el punto óptimo de funcionamiento de cada unidad, no obstante lo anterior dada la complejidad de coordinación de recursos y el nivel de planificación necesaria para desarrollar cada experimento de manera real se optó por ejecutar el experimento en una sola unidad, la que servirá como proyecto piloto, cuyos resultados una vez que muestren beneficios reales para la operación de la central se podrán replicar al resto de la unidades y así extender e incorporar la mejora al proceso completo estandarizando el comportamiento deseado en los distintos ejes que abarca el proceso, tema que es relevante para la implantación y sostenibilidad de la mejora que será abordado como apartado al final de esta etapa.

En la siguiente tabla se muestra el planteamiento de factores del experimento y los niveles de interés para cada factor, pudiendo ser aplicados para cualquiera de las unidades N°3, N°4 y N°5.

Tabla N° 42. Definición de Factores y Niveles del experimento.

Factores	Niveles		
	Bajo (-1)	Punto Central	Alto (+1)
Poder Calorífico Superior (HHV)	5.750	6.340	6.930
Porcentaje de Ceniza (%Cz)	12%	18,5%	25%
Índice de Hinchamiento (FSI)	2	4,5	7
Granulometría o fineza (Fz) % < 200 micras	50%	67,5%	85%
Porcentaje de humedad total	5,3%	6,4%	7,5%

Fuente: Elaboración propia, 2014.

La variable de salida para el experimento será el Consumo Especifico resultante para la unidad de generación seleccionada para ejecutar el experimento.

8.1.2 Creación de tabla de datos experimentales para las distintas combinaciones o corridas de prueba.

Para los 5 factores y los 2 niveles definidos para cada uno (Bajo y Alto) se requiere una cantidad de combinaciones igual a $2^5 = 32$, si a esto le sumamos las dos corridas de prueba adicionales para los Puntos Centrales, tenemos un total de 34 combinaciones o corridas de prueba. Se ha seleccionado la ejecución de las pruebas experimentales de forma aleatoria en el software “Minitab 16”, donde se obtuvo la siguiente tabla de datos experimentales los que deben ser puestos a prueba en cada corrida para así obtener el resultado de la variable de salida en cada corrida de prueba ejecutada.

Tabla N° 43. Tabla de pruebas aleatorias a realizar en el experimento. Elaborada para los factores y niveles definidos, utilizando software Minitab 16

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	HHV	%Cz	FSI	%Fza	%Ht
13	1	1	1	5.750,0	12,0	7,0	85,0	5,3
26	2	1	1	6.930,0	12,0	2,0	85,0	7,5
18	3	1	1	6.930,0	12,0	2,0	50,0	7,5
33	4	0	1	6.340,0	18,5	4,5	67,5	6,4
1	5	1	1	5.750,0	12,0	2,0	50,0	5,3
30	6	1	1	6.930,0	12,0	7,0	85,0	7,5
14	7	1	1	6.930,0	12,0	7,0	85,0	5,3
31	8	1	1	5.750,0	25,0	7,0	85,0	7,5
23	9	1	1	5.750,0	25,0	7,0	50,0	7,5
11	10	1	1	5.750,0	25,0	2,0	85,0	5,3
15	11	1	1	5.750,0	25,0	7,0	85,0	5,3
27	12	1	1	5.750,0	25,0	2,0	85,0	7,5
2	13	1	1	6.930,0	12,0	2,0	50,0	5,3
3	14	1	1	5.750,0	25,0	2,0	50,0	5,3
9	15	1	1	5.750,0	12,0	2,0	85,0	5,3
25	16	1	1	5.750,0	12,0	2,0	85,0	7,5
28	17	1	1	6.930,0	25,0	2,0	85,0	7,5
21	18	1	1	5.750,0	12,0	7,0	50,0	7,5
4	19	1	1	6.930,0	25,0	2,0	50,0	5,3
22	20	1	1	6.930,0	12,0	7,0	50,0	7,5
32	21	1	1	6.930,0	25,0	7,0	85,0	7,5
16	22	1	1	6.930,0	25,0	7,0	85,0	5,3
17	23	1	1	5.750,0	12,0	2,0	50,0	7,5
20	24	1	1	6.930,0	25,0	2,0	50,0	7,5
34	25	0	1	6.340,0	18,5	4,5	67,5	6,4
7	26	1	1	5.750,0	25,0	7,0	50,0	5,3
24	27	1	1	6.930,0	25,0	7,0	50,0	7,5
5	28	1	1	5.750,0	12,0	7,0	50,0	5,3
29	29	1	1	5.750,0	12,0	7,0	85,0	7,5
8	30	1	1	6.930,0	25,0	7,0	50,0	5,3
19	31	1	1	5.750,0	25,0	2,0	50,0	7,5
12	32	1	1	6.930,0	25,0	2,0	85,0	5,3
6	33	1	1	6.930,0	12,0	7,0	50,0	5,3
10	34	1	1	6.930,0	12,0	2,0	85,0	5,3

Fuente: Elaboración propia usando software Minitab 16 (Estadísticas/DOE/Factorial/Crear diseño factorial) en base a datos simulados.

8.1.3 Planificación operacional para el desarrollo del experimento.

Para cada una de las 34 corridas de prueba experimentales se requiere encontrar la mezcla de carbón que cumplirá con los niveles de cada uno de los 5 factores que compone cada corrida, para ello es necesario preparar la mezcla adecuada de carbón de cada corrida de prueba seleccionado el tipo y cantidad carbón necesario.

De este modo se escoge a la Unidad de Generación N°5 para aplicar el proyecto piloto y ejecutar el experimento dado que esta unidad presenta la mayor holgura entre las emisiones de material particulado como resultado del desempeño actual del precipitador electrostático y el valor máximo para este parámetro impuesto por la resolución medioambiental, según la Figura

Nº 29, por lo que tiene el mayor beneficio potencial económico al utilizar mezclas de carbón más económicas que la situación actual.

Una vez definida la unidad de generación donde se desarrollaría el experimento, se deduce que el carbón a utilizar como base para el experimento corresponde al carbón que actualmente consume la unidad en la Pila N°2 según lo expuesto en la Figura N°. Para obtener los diferentes niveles de los factores Poder Calorífico, Porcentaje de Ceniza e Índice de Hinchamiento, para cada corrida de prueba del experimento fue necesario construir pequeñas pilas experimentales (34 en total), con distintos porcentajes de mezclas entre el carbón proveniente de la Pila N°2 y carbón mixto del proveedor MILPA, correspondiente a residuo de la industria coquizadora, cuyo comportamiento en la mezcla nos interesa evaluar con el propósito de optimizar el costo unitario del carbón de consumo.

En algunos casos será necesario corregir el valor del nivel requerido de algún factor específico, para lo que se recurrirá a analizar el comportamiento histórico de cada proveedor según se muestra en la Figura N° 74, para posteriormente determinar la cantidad de carbón necesario, teniendo la consideración que el proveedor tenga asignada la pila N°2 para la descarga en el patio. Respecto a los parámetros de Porcentaje de Humedad Total y Granulometría, estos se regularán para los niveles requeridos para cada prueba por medio de maniobras operacionales estrictas, utilizando como guía un instructivo de trabajo elaborado en conjunto con el personal especialista del Área de Operaciones de la Central “Ejemplo”, el que detalla de manera secuencial las instrucciones para conformar cada pila experimental, como por ejemplo, las instrucciones secuenciales para el almacenamiento bajo una cubierta o carpa apropiada para controlar la humedad de la pila de prueba y así mitigar el efecto de la lluvia, o definir cuándo y cómo efectuar la humectación forzada utilizando el sistema de regadío en caso de necesitar elevar el porcentaje de humedad. Algo similar se efectuará para el caso de control de la granulometría, lo cual se conseguirá controlando la apertura de la clasificadora de gruesos, en la etapa posterior al proceso de molienda, para lo cual también se construirá una guía de maniobra junto al personal especialista del Área de Operaciones de la Central.

Para realizar lo anteriormente descrito se requerirá acopiar, demarcar y señalar adecuadamente las pilas de carbón de cada corrida de prueba, considerando la cantidad suficiente que asegurara efectuar cada prueba sin interrumpir el suministro de carbón a la unidad seleccionada, para esto último se considera calcular la cantidad de consumo a plena carga de la unidad de generación N°5 durante un período de al menos 4 horas tomando como referencia la curva de consumo específico de esta unidad, teniendo en cuenta que se requieren 2 horas de generación en carga estable para efectuar las mediciones y la aplicación del método VACE en cada corrida y que se considera una hora de generación antes y después de la prueba, en las cuales se produce el traslape entre el carbón de pilas experimentales correspondientes a una prueba y otra y donde se tiene mayor probabilidad de generar mezclas de diferentes pilas experimentales de carbón, como por ejemplo en las correas, tolvas de alimentación y sobre todo en los molinos, situación que lleva a la determinación de que en estos periodos, de una hora antes y una después de la medición mediante la aplicación del método VACE, se descartará tomar cualquier otro tipo de medición y del análisis, con el propósito de producir confusión en los resultados.

Otro punto importante a considerar en la planificación de las pruebas del experimento, es la elaboración de la mezcla de carbón de cada pila de prueba de manera homogénea, es decir una vez que se determinó el origen del carbón y las cantidades adecuadas a mezclar para conformar la pila de cada prueba del experimento, se deberá batir cada pila de carbón de prueba utilizando maquinaria adecuada, tales como cargadores frontales, para posteriormente tomar muestras de carbón en distintos puntos de la pila y efectuar pruebas de laboratorio para cerciorarnos de que se han conseguido los niveles exigidos para cada parámetro y en una forma homogénea en la pila.



Figura N° 76. Ejecución de mezcla homogénea de cantidades de distintos proveedores para la conformación de pilas de prueba para el experimento. (Elaboración propia, 2014)



Figura N° 77. Toma de muestras para análisis de laboratorio y medición de Porcentaje de Ceniza. (Elaboración propia, 2014)

Un aspecto clave a destacar es que la no consecución de homogeneidad adecuada en la calidad del carbón en las pilas de prueba concatenará la aparición de baches u oscilaciones durante la combustión y por lo tanto también en los niveles de generación de energía eléctrica, presión de vapor principal y temperatura al interior de la caldera, lo que no afectaría la seguridad del proceso, pero podría provocar errores en las lecturas de datos que se necesitan para el análisis del experimento, como por ejemplo la medición de la potencia eléctrica

generada en $t=t_1$, puede coincidir con un peak de una oscilación en la combustión, mientras que la muestra de carbón de consumo necesaria para medir el consumo específico que se toma en la banda transportadora, podría coincidir para el mismo periodo de tiempo $t=t_1$, con una parte del carbón no homogéneo de la pila de prueba, cuyo resultado del laboratorio podría arrojar un bajo poder calorífico, lo cual no tendría ninguna relación con el peak de generación medido para el mismo periodo de tiempo provocando un error en resultado del análisis.

En cuanto al cálculo de las cantidades de carbón de cada pila experimental se recurrirá al resultado del Factor de Consumo de la Unidad de Generación N°5 que se muestra en la Figura N° 26, obteniendo un consumo de aproximadamente 34 Toneladas/Hora a plena carga, por lo que el cálculo para cuatro horas de generación arroja un resultado de $34 \times 4 = 136$ Toneladas de Carbón para una base de 6930 kcal/Kg, correspondiente al valor alto de carbón definido para el experimento, luego aplicando la ecuación de equilibrio de calor $Q \text{ [Kcal]} = mc \text{ [kg]} \times \text{HHV} \text{ [kcal/kg]}$, se puede obtener las cantidades de las pilas experimentales para los niveles Alto, Medio y Bajo de Poder Calorífico, las cuales se muestran en la siguiente tabla. (Para generar a plena carga de manera estable, se debe mantener el calor en el interior de la caldera, por lo que si bajamos el poder calorífico del carbón, se debe aumentar la masa).

Tabla N° 44. Cantidad de Carbón para conformar pilas para las pruebas experimentales, en función del poder calorífico.

	HHV [kcal/kg]	Masa por Pila de Prueba [kg]
HHV Alto	6.930	136.000
HHV Medio	6.340	148.656
HHV Bajo	5.750	163.910

Fuente: Elaboración propia en base cálculos obtenidos usando los valores promedios poder calorífico del carbón suministrado a la central “Ejemplo”

En total se requerirá conformar 34 pilas de carbón, con un total de 5.098 Toneladas de carbón y un total de 136 horas de generación continua a plena carga de la unidad N°5 (34 corridas de prueba x 4 horas cada una).

8.1.4 Resultado del experimento.

Los resultados simulados de Consumo Específico (C.E) para cada una de las 34 corridas de prueba, se muestra a continuación en la siguiente tabla.

Tabla N° 45. Resultado de los efectos de los factores definidos en el experimento, sobre el Consumo Específico de la Unidad de Generación N°5.

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	HHV	%Cz	FSI	%Fza	%Ht	Toneladas Pila de Prueba	Hrs de Generación	C.E	
13	1	1	1	5.750,0	12,0	7,0	85,0	5,3	164	4,0	3.383,1	
26	2	1	1	6.930,0	12,0	2,0	85,0	7,5	136	4,0	2.696,5	
18	3	1	1	6.930,0	12,0	2,0	50,0	7,5	136	4,0	3.025,2	
33	4	0	1	6.340,0	18,5	4,5	67,5	6,4	149	4,0	3.207,6	
1	5	1	1	5.750,0	12,0	2,0	50,0	5,3	164	4,0	3.492,6	
30	6	1	1	6.930,0	12,0	7,0	85,0	7,5	136	4,0	2.915,4	
14	7	1	1	6.930,0	12,0	7,0	85,0	5,3	136	4,0	2.911,1	
31	8	1	1	5.750,0	25,0	7,0	85,0	7,5	164	4,0	3.327,5	
23	9	1	1	5.750,0	25,0	7,0	50,0	7,5	164	4,0	3.759,0	
11	10	1	1	5.750,0	25,0	2,0	85,0	5,3	164	4,0	3.183,1	
15	11	1	1	5.750,0	25,0	7,0	85,0	5,3	164	4,0	3.329,1	
27	12	1	1	5.750,0	25,0	2,0	85,0	7,5	164	4,0	3.187,5	
2	13	1	1	6.930,0	12,0	2,0	50,0	5,3	136	4,0	3.020,6	
3	14	1	1	5.750,0	25,0	2,0	50,0	5,3	164	4,0	3.531,6	
9	15	1	1	5.750,0	12,0	2,0	85,0	5,3	164	4,0	3.144,1	
25	16	1	1	5.750,0	12,0	2,0	85,0	7,5	164	4,0	3.148,5	
28	17	1	1	6.930,0	25,0	2,0	85,0	7,5	136	4,0	2.715,6	
21	18	1	1	5.750,0	12,0	7,0	50,0	7,5	164	4,0	3.713,0	
4	19	1	1	6.930,0	25,0	2,0	50,0	5,3	136	4,0	3.059,6	
22	20	1	1	6.930,0	12,0	7,0	50,0	7,5	136	4,0	3.264,0	
32	21	1	1	6.930,0	25,0	7,0	85,0	7,5	136	4,0	2.954,5	
16	22	1	1	6.930,0	25,0	7,0	85,0	5,3	136	4,0	2.950,1	
17	23	1	1	5.750,0	12,0	2,0	50,0	7,5	164	4,0	3.497,0	
20	24	1	1	6.930,0	25,0	2,0	50,0	7,5	136	4,0	3.064,0	
34	25	0	1	6.340,0	18,5	4,5	67,5	6,4	149	4,0	3.200,6	
7	26	1	1	5.750,0	25,0	7,0	50,0	5,3	164	4,0	3.760,6	
24	27	1	1	6.930,0	25,0	7,0	50,0	7,5	136	4,0	3.303,1	
5	28	1	1	5.750,0	12,0	7,0	50,0	5,3	164	4,0	3.711,6	
29	29	1	1	5.750,0	12,0	7,0	85,0	7,5	164	4,0	3.387,5	
8	30	1	1	6.930,0	25,0	7,0	50,0	5,3	136	4,0	3.298,6	
19	31	1	1	5.750,0	25,0	2,0	50,0	7,5	164	4,0	3.536,0	
12	32	1	1	6.930,0	25,0	2,0	85,0	5,3	136	4,0	2.801,1	
6	33	1	1	6.930,0	12,0	7,0	50,0	5,3	136	4,0	3.259,6	
10	34	1	1	6.930,0	12,0	2,0	85,0	5,3	136	4,0	2.782,1	
									Total	5.098,0	136,0	

Fuente: Elaboración propia en base a datos simulados según resultado de prueba de mezclas de carbón en la unidad N°5.

8.1.5 Análisis gráfico de los resultados del DOE.

Los análisis del resultado del experimento se obtuvieron utilizando el software Minitab 16: en modo *Estadística/DOE/Factorial/Analizar diseño factorial*.

Las siguientes gráficas nos muestran los efectos independientes de cada factor sobre la variable de salida “Consumo Específico”, así como el efecto de las interacciones entre los distintos factores sobre la misma variable de salida.

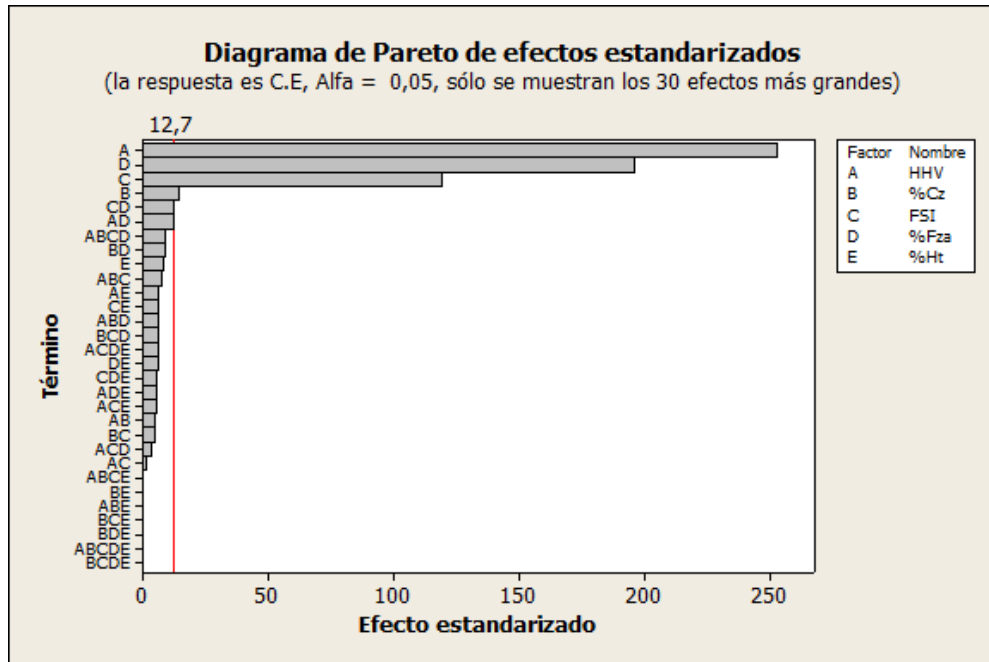


Figura N° 78. Gráfica de Pareto de los efectos de los factores e interacciones sobre la variable de salida Consumo Especifico. (Elaboración propia, 2014)

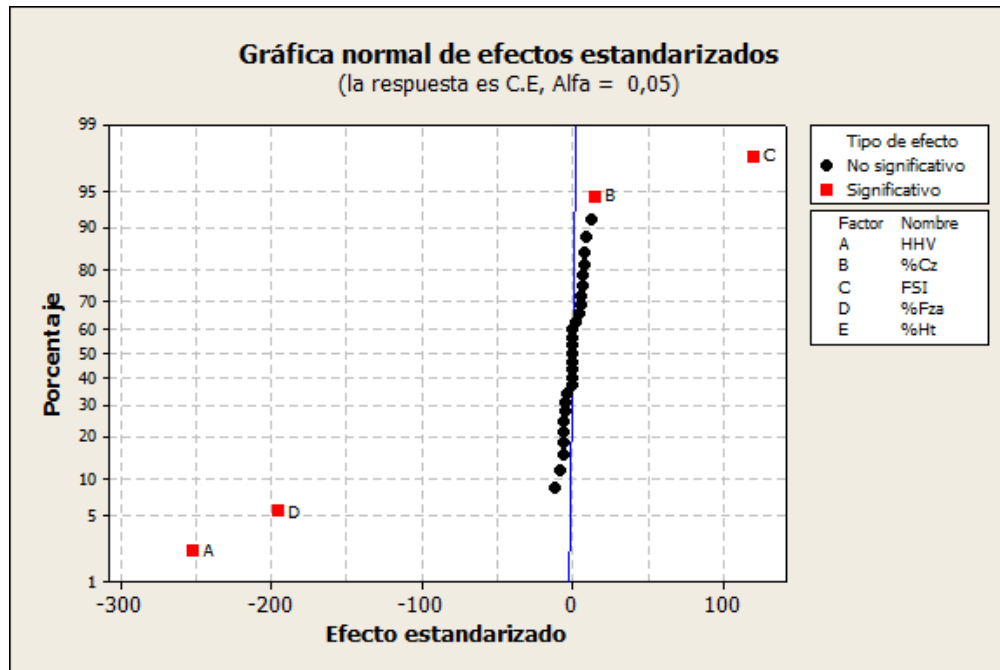


Figura N° 79. Gráfica Normal de Efectos Principales. (Elaboración propia, 2014)

Las gráficas anteriores nos muestran:

- Que los efectos estadísticamente significativos se observan solo en 4 de los 5 factores independientes y que las interacciones entre los factores no tiene efectos significativos.
- Que los parámetros “Poder Calorífico Superior (HHV)” y “Porcentaje de Fineza (%Fza)” del carbón de consumo, tienen los efectos principales más significativos respectivamente sobre el resultado del consumo específico y que ambos efectos son de reducción (-), es decir al aumentar los niveles de estos factores se reduce el consumo específico, por tanto van en beneficio del resultado deseado que es justamente mejorar la eficiencia de las maquinas, reduciendo el consumo específico.
- Que los parámetros “Índice de Hinchamiento (FSI)” y “Porcentaje de Ceniza (%Cz)”, del carbón de consumo, tienen el tercer y cuarto lugar en efectos significativos respectivamente y que ambos efectos son de aumento (+) , es decir al aumentar los niveles de estos factores, aumenta el consumo específico, por tanto van en contra del resultado deseado, empeorando la eficiencia.

Para profundizar el análisis de los efectos significativos de los distintos parámetros, en la siguiente figura se muestra la magnitud de los efectos de cada parámetro independiente sobre el consumo específico. En el eje horizontal de cada recuadro, se muestran los valores para los distintos niveles de cada factor. En el eje vertical común para todos los recuadros, se muestra en una misma escala de medición, los resultados obtenidos en el consumo específico. En color negro se muestra la recta trazada entre el par de coordenadas formado por el nivel alto y bajo de cada parámetro y el resultado del consumo específico obtenido.

$(X1, Y1)$ = (Factor X en nivel Alto, Consumo específico resultante para el factor X en su nivel alto).

$(X2, Y2)$ = (Factor X en nivel Bajo, Consumo específico resultante para el factor X en su nivel bajo).

Observando la inclinación y signo de la pendiente de la línea recta en cada recuadro, es posible apreciar la magnitud del efecto y su característica positiva (pendiente positiva) o negativa (pendiente negativa), de cada parámetro sobre la variable de salida.

El punto rojo en cada recuadro indica el resultado obtenido para el consumo específico, con los valores de puntos centrales de cada factor, esto nos permite apreciar en este caso particular que el efecto de cada parámetro sobre el consumo específico es de carácter lineal, ya que el punto rojo prácticamente coincide o es parte de la recta de color negro.

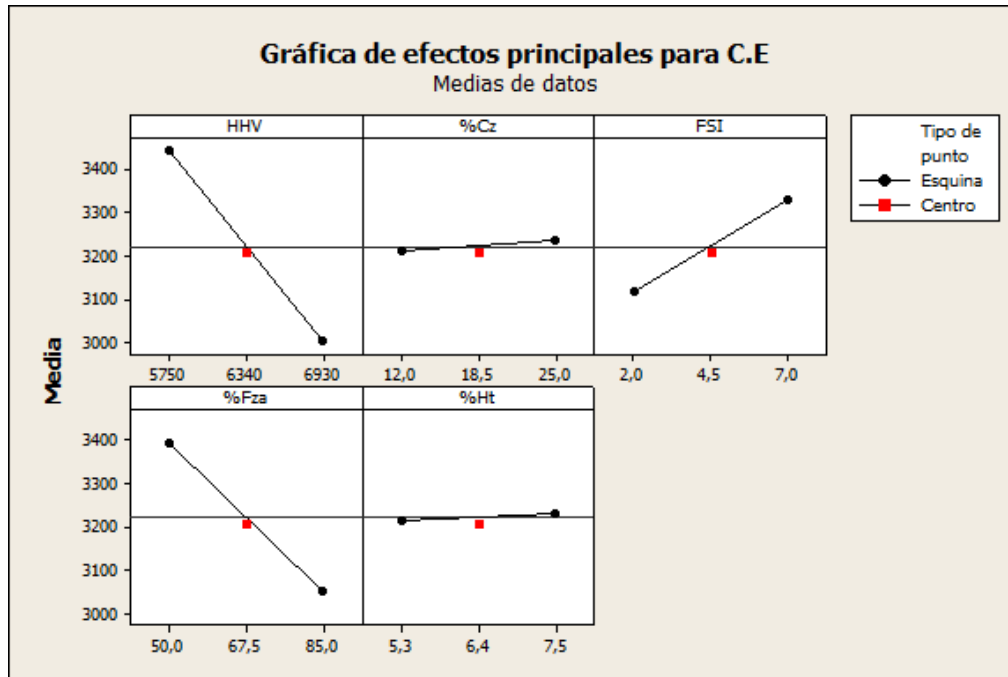


Figura N° 80. Gráfica de Efectos Principales. Verificación de linealidad de los efectos utilizando el punto central. (Elaboración propia, 2014)

Tal como se analizó en las figuras anteriores “Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados” y “Gráfica Normal de los Efectos Estandarizados”, en esta última también se evidencia que los principales efectos sobre el resultado del consumo específico en orden decreciente corresponden a los factores **Poder Calorífico** (HHV, efecto reductor de consumo específico), **Porcentaje de Fineza** (%Fza, efecto reductor del consumo específico), **Índice de Hinchamiento** (FSI, efecto de incremento del consumo específico) y **Porcentaje de Ceniza** (%Cz, efecto de incremento del consumo específico). Por último en la figura anterior se observa que el **Porcentaje de Humedad Total** no tiene afecto significativo sobre el resultado del consumo específico.

Aunque en las figuras anteriores “Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados” y “Gráfica Normal de los Efectos Estandarizados” se evidencia que no existen efectos significativos en el resultado del consumo específico como consecuencia de las interacciones entre los distintos factores, en la siguiente gráfica se profundiza el análisis de la existencia o no de las interacciones entre los distintos factores.

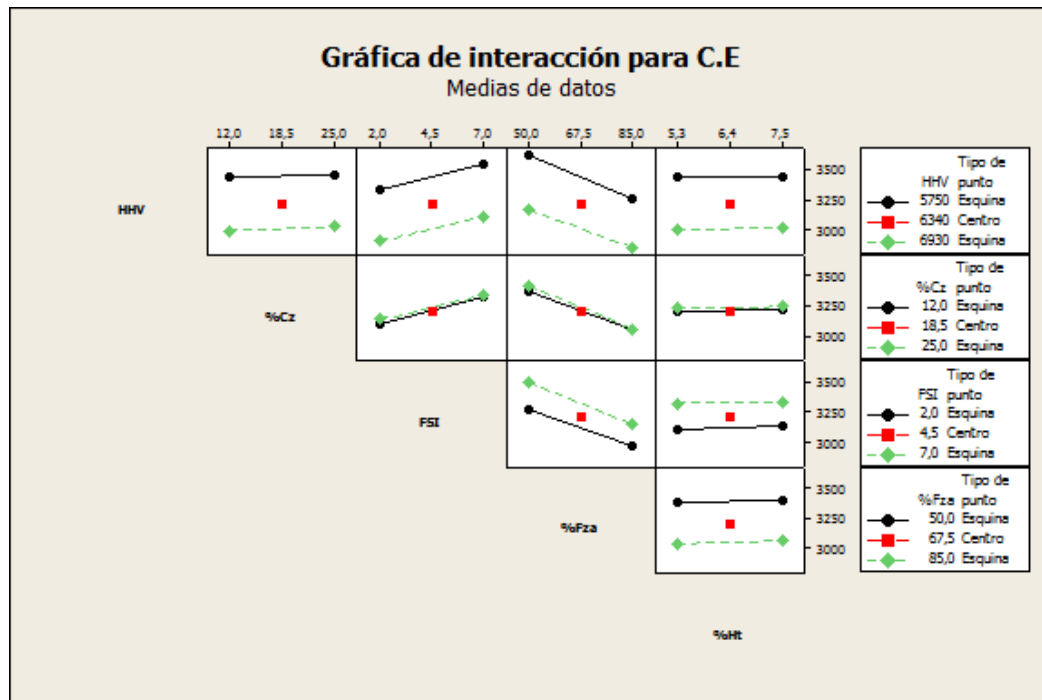


Figura N° 81. Gráfica de Interacciones entre los distintos factores. (Elaboración propia, 2014)

En la gráfica anterior cada cuadro muestra una gráfica de interacciones individual para dos factores, en donde se visualizan las medias resultantes para cada nivel de un factor, manteniendo constante el nivel alto (línea de color negro) y el nivel bajo (línea de color verde) del segundo factor, el que se identifica al costado izquierdo de cada fila de gráficas.

Se observa que prácticamente existe paralelismo entre las líneas negras y verdes de cada gráfica individual, por lo que podemos determinar como resultado de la gráfica anterior no hay presencia de interacción entre factores, es decir que la respuesta obtenida para el Consumo Especifico como resultado del efecto de un nivel determinado de un factor, no depende del nivel de otro factor.

8.1.6 Análisis de Varianza (ANOVA). Planteamiento del modelo matemático obtenido.

A continuación se muestra el resultado del Ajuste factorial: C.E vs. HHV; %Cz; FSI; %Fza; %Ht efectuado por el software Minitab 16 con los datos resultantes del experimento.

Ajuste factorial: C.E vs. HHV; %Cz; FSI; %Fza; %Ht

Efectos y coeficientes estimados para C.E (unidades codificadas)

Tabla N° 46. Modelo matemático para el resultado experimental obtenido.

Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante		3222,3	0,8750	3682,60	0,000
HHV	-441,9	-221,0	0,8750	-252,52	0,003
%Cz	25,6	12,8	0,8750	14,61	0,044
FSI	208,9	104,5	0,8750	119,38	0,005
%Fza	-342,5	-171,2	0,8750	-195,69	0,003
%Ht	13,8	6,9	0,8750	7,90	0,080
HHV*%Cz	8,4	4,2	0,8750	4,82	0,130
HHV*FSI	2,5	1,3	0,8750	1,45	0,384
HHV*%Fza	21,4	10,7	0,8750	12,24	0,052
HHV*%Ht	10,9	5,4	0,8750	6,22	0,101
%Cz*FSI	-8,4	-4,2	0,8750	-4,81	0,130
%Cz*%Fza	-15,5	-7,8	0,8750	-8,88	0,071
%Cz*%Ht	-0,4	-0,2	0,8750	-0,21	0,868
FSI*%Fza	-21,4	-10,7	0,8750	-12,25	0,052
FSI*%Ht	-10,9	-5,4	0,8750	-6,22	0,101
%Fza*%Ht	10,5	5,3	0,8750	6,00	0,105
HHV*%Cz*FSI	13,5	6,7	0,8750	7,69	0,082
HHV*%Cz*%Fza	10,6	5,3	0,8750	6,05	0,104
HHV*%Cz*%Ht	0,4	0,2	0,8750	0,20	0,872
HHV*FSI*%Fza	-6,1	-3,0	0,8750	-3,47	0,179
HHV*FSI*%Ht	-9,4	-4,7	0,8750	-5,38	0,117
HHV*%Fza*%Ht	9,7	4,9	0,8750	5,56	0,113
%Cz*FSI*%Fza	-10,6	-5,3	0,8750	-6,05	0,104
%Cz*FSI*%Ht	-0,3	-0,2	0,8750	-0,19	0,881
%Cz*%Fza*%Ht	0,0	0,0	0,8750	0,01	0,993
FSI*%Fza*%Ht	-9,8	-4,9	0,8750	-5,57	0,113
HHV*%Cz*FSI*%Fza	15,5	7,8	0,8750	8,88	0,071
HHV*%Cz*FSI*%Ht	0,4	0,2	0,8750	0,22	0,859
HHV*%Cz*%Fza*%Ht	-0,0	-0,0	0,8750	-0,00	0,998
HHV*FSI*%Fza*%Ht	-10,5	-5,3	0,8750	-6,02	0,105
%Cz*FSI*%Fza*%Ht	0,0	0,0	0,8750	0,00	0,998
HHV*%Cz*FSI*%Fza*%Ht	-0,0	-0,0	0,8750	-0,01	0,993
Pt Ctrial		-18,2	3,6077	-5,05	0,124

S = 4,94975

PRESS = *

R-cuad. = 100,00%

R-cuad. (pred.) = *%

R-cuad. (ajustado) = 99,8%

Fuente: Elaboración propia usando software Minitab 16, en base a datos simulados según resultado de prueba de mezclas de carbón en la unidad N°5.

Con la tabla anterior es posible obtener:

- La Ecuación de Transferencia para el Consumo Específico ya que esta nos arroja la constante y los coeficientes estimados para los distintos factores e interacciones.
- El grado de ajuste de la ecuación obtenida a los resultados reales del experimento, en este caso el Coeficiente de Determinación R es 1 (R-cuad.=99,98%), por tanto indica que prácticamente el 100% de la variación en consumo específico esta explicado por el modelo o ecuación de transferencia.
- Efectos significativos de los términos de la ecuación de transferencia, sobre el consumo específico, los cuales se extraen para los valores de P (PValue) < 0,05. En este caso corresponden a los factores del Diseño de Experimento, cuyo efecto significativo ya había sido demostrado anteriormente, correspondientes a Poder Calorífico Superior, Porcentaje

de Fineza, Índice de Hinchamiento y muy en menor grado el Porcentaje de Humedad Total del carbón de consumo.

- El punto central no presenta un valor significativo, por lo que la curvatura no es significativa.

La ecuación de transferencia encontrada es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 C.E = & 3222,3 - 221 \times (HHV) + 12,8 \times (\%Cz) + 104,5 \times (FSI) - 171,2 \times (\%Fza) \\
 & + 6,9 \times (\%Ht) + 4,2 \times (HHV \times \%Cz) + 1,3 \times (HHV \times FSI) \\
 & + 10,7 \times (HHV \times \%Fza) + 5,4 \times (HHV \times \%Ht) - 4,2 \times (\%Cz \times FSI) \\
 & - 7,8 \times (\%Cz \times \%Fza) - 0,2 \times (\%Cz \times \%Ht) - 10,7 \times (FSI \times \%Fza) \\
 & - 5,4 \times (FSI \times \%Ht) + 5,3 \times (\%Fza \times \%Ht) \\
 & + 6,7 \times (HHV \times \%Cz \times FSI) + 5,3 \times (HHV \times \%Cz \times \%Fza) \\
 & + 0,2 \times (HHV \times \%Cz \times \%Ht) - 3 \times (HHV \times FSI \times \%Fza) \\
 & - 4,7 \times (HHV \times FSI \times \%Ht) + 4,9 \times (HHV \times \%Fza \times \%Ht) \\
 & - 5,3 \times (\%Cz \times FSI \times \%Fza) - 0,2 \times (\%Cz \times FSI \times \%Ht) \\
 & - 4,9 \times (FSI \times \%Fza \times \%Ht) + 7,8 \times (HHV \times \%Cz \times FSI \times \%Fza) \\
 & + 0,2 \times (HHV \times \%Cz \times FSI \times \%Ht) \\
 & - 5,3 \times (HHV \times FSI \times \%Fza \times \%Ht)
 \end{aligned}$$

La siguiente tabla muestra el resultado de análisis de varianza (ANOVA) efectuado para el resultado del experimento.

Tabla N° 47. Análisis de Varianza (ANOVA) para el Consumo Especifico.

Análisis de varianza para C.E (unidades codificadas)						
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Efectos principales	5	2856471	2856471	571294	23318,13	0,005
HHV	1	1562333	1562333	1562333	63768,70	0,003
%Cz	1	5230	5230	5230	213,46	0,044
FSI	1	349174	349174	349174	14252,01	0,005
%Fza	1	938207	938207	938207	38294,16	0,003
%Ht	1	1528	1528	1528	62,35	0,080
2° orden (interacciones)	10	13254	13254	1325	54,10	0,105
HHV*%Cz	1	570	570	570	23,28	0,130
HHV*FSI	1	52	52	52	2,11	0,384
HHV*%Fza	1	3670	3670	3670	149,81	0,052
HHV*%Ht	1	949	949	949	38,75	0,101
%Cz*FSI	1	567	567	567	23,14	0,130
%Cz*%Fza	1	1933	1933	1933	78,90	0,071
%Cz*%Ht	1	1	1	1	0,04	0,868
FSI*%Fza	1	3679	3679	3679	150,16	0,052
FSI*%Ht	1	949	949	949	38,75	0,101
%Fza*%Ht	1	883	883	883	36,04	0,105
3° orden (interacciones)	10	5765	5765	576	23,53	0,159
HHV*%Cz*FSI	1	1449	1449	1449	59,13	0,082
HHV*%Cz*%Fza	1	896	896	896	36,55	0,104
HHV*%Cz*%Ht	1	1	1	1	0,04	0,872
HHV*FSI*%Fza	1	295	295	295	12,03	0,179
HHV*FSI*%Ht	1	710	710	710	28,96	0,117
HHV*%Fza*%Ht	1	757	757	757	30,92	0,113
%Cz*FSI*%Fza	1	896	896	896	36,55	0,104
%Cz*FSI*%Ht	1	1	1	1	0,04	0,881
%Cz*%Fza*%Ht	1	0	0	0	0,00	0,993
FSI*%Fza*%Ht	1	761	761	761	31,08	0,113
4° orden (interacciones)	5	2821	2821	564	23,03	0,157
HHV*%Cz*FSI*%Fza	1	1933	1933	1933	78,90	0,071
HHV*%Cz*FSI*%Ht	1	1	1	1	0,05	0,859
HHV*%Cz*%Fza*%Ht	1	0	0	0	0,00	0,998
HHV*FSI*%Fza*%Ht	1	887	887	887	36,21	0,105
%Cz*FSI*%Fza*%Ht	1	0	0	0	0,00	0,998
5° orden (interacciones)	1	0	0	0	0,00	0,993
HHV*%Cz*FSI*%Fza*%Ht	1	0	0	0	0,00	0,993
Curvatura	1	625	625	625	25,53	0,124
Error residual	1	25	25	25		
Error puro	1	25	25	25		
Total	33	2878962				

Fuente: Elaboración propia usando software Minitab 16, en base a datos simulados según resultado de prueba de mezclas de carbón en la unidad N°5.

Como resultado del ANOVA se resuelve:

- Solo hay efectos significativos de primer orden sobre el Consumo Especifico, para los factores HHV, %Cz, FSI y %Fza, definidos en el experimento.
- No hay efectos significativos para las interacciones de 2°, 3°, 4° y 5° orden, entre los parámetros definidos en el experimento.
- La curvatura no es significativa, por lo tanto el modelo lineal encontrado se considera válido.

8.1.7 Obtención del ajuste óptimo para el proceso.

Para determinar cuál es la mejor combinación o el ajuste optimo del proceso se recurrió a la herramienta de Grafica de Cubos para los 5 factores considerados en el experimento y sus distintos niveles. Esta gráfica muestra las medias de los datos de la variable de respuesta "Consumo Especifico" para cada combinación de niveles de los distintos factores.

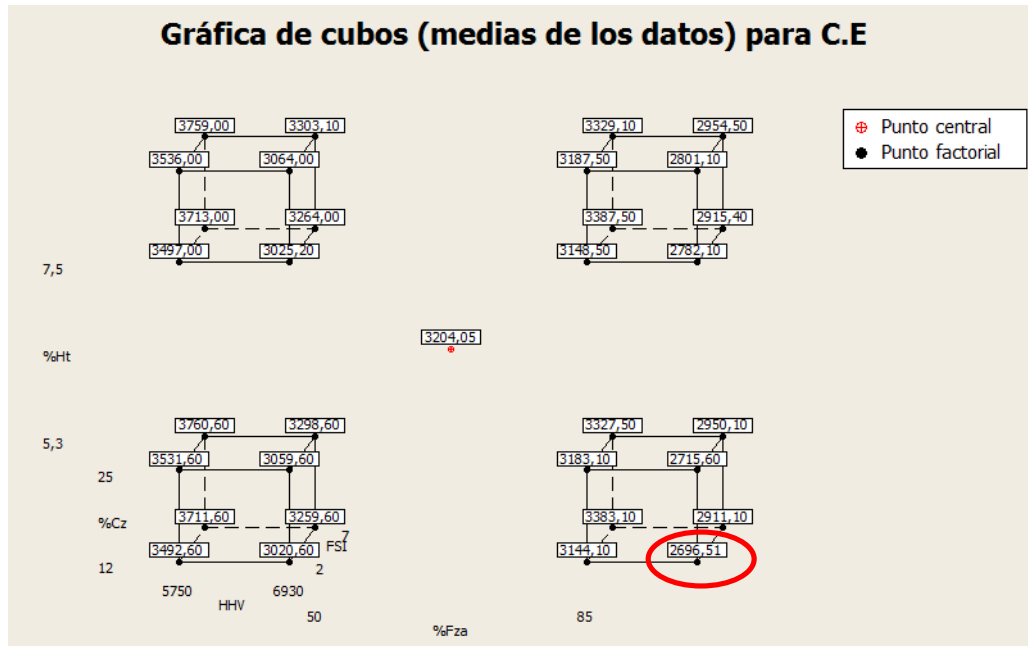


Figura N°82. Gráfica de cubos para obtener el ajuste óptimo del proceso. (Elaboración propia, 2014)

La gráfica de cubos nos muestra que el mejor resultado de la variable de respuesta “Consumo Específico” fue de 2.696,51[kcal/kWh] y se obtuvo con la siguiente combinación de niveles de los factores definidos para el carbón de consumo.

Ajuste Óptimo del Proceso:

Poder Calorífico Superior (HHV)	=	6930 [kcal/kg]
Porcentaje de Ceniza (%Cz)	=	12%
Índice de Hinchamiento (FSI)	=	2
Porcentaje de Fineza (%Fza)	=	85% del carbón < 200 micras
Porcentaje de Humedad Total (%Ht)	=	5,3%

8.2 Resultado de las variables relevantes post combustión del Carbón.

Tal como se mencionó en el punto 8.1.1 para cada corrida de prueba se efectuaron mediciones del Material Particulado como resultado de emisiones medioambientales y del Porcentaje de Inquemados como resultado de las pérdidas en el proceso. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos.

Tabla N° 48. Resultado de Variables Relevantes para la Etapa de Post Combustión.
(Elaborado por los autores de esta tesis)

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	C.E [kcal/kg]	Mezcla Carbón PiIa2-Mixto	Material Particulado 10x[mg/m3]	%Inquemados
13	1	1	1	3.383,1	60%-40%	857,90	12,10%
26	2	1	1	2.696,5	80%-20%	859,60	6,78%
18	3	1	1	3.025,2	80%-20%	859,90	15,22%
33	4	0	1	3.207,6	70%-30%	922,80	14,23%
1	5	1	1	3.492,6	60%-40%	861,00	15,21%
30	6	1	1	2.915,4	80%-20%	860,80	11,98%
14	7	1	1	2.911,1	80%-20%	861,20	12,00%
31	8	1	1	3.327,5	60%-40%	997,00	11,99%
23	9	1	1	3.759,0	60%-40%	996,80	20,43%
11	10	1	1	3.183,1	60%-40%	997,10	6,81%
15	11	1	1	3.329,1	60%-40%	996,70	11,98%
27	12	1	1	3.187,5	60%-40%	997,10	6,78%
2	13	1	1	3.020,6	80%-20%	861,30	15,28%
3	14	1	1	3.531,6	60%-40%	997,10	15,21%
9	15	1	1	3.144,1	60%-40%	861,00	6,75%
25	16	1	1	3.148,5	60%-40%	859,80	6,71%
28	17	1	1	2.715,6	80%-20%	983,10	6,75%
21	18	1	1	3.713,0	60%-40%	859,80	20,41%
4	19	1	1	3.059,6	80%-20%	996,90	15,21%
22	20	1	1	3.264,0	80%-20%	859,50	20,40%
32	21	1	1	2.954,5	80%-20%	987,80	12,01%
16	22	1	1	2.950,1	80%-20%	988,30	11,99%
17	23	1	1	3.497,0	60%-40%	861,10	15,20%
20	24	1	1	3.064,0	80%-20%	997,30	15,23%
34	25	0	1	3.200,6	70%-30%	923,10	14,25%
7	26	1	1	3.760,6	60%-40%	997,00	20,42%
24	27	1	1	3.303,1	80%-20%	996,80	20,38%
5	28	1	1	3.711,6	60%-40%	860,60	20,45%
29	29	1	1	3.387,5	60%-40%	861,00	12,01%
8	30	1	1	3.298,6	80%-20%	997,20	20,39%
19	31	1	1	3.536,0	60%-40%	1.000,00	15,18%
12	32	1	1	2.801,1	80%-20%	993,90	6,73%
6	33	1	1	3.259,6	80%-20%	861,40	20,43%
10	34	1	1	2.782,1	80%-20%	859,40	6,77%

Fuente: Elaboración propia en base a datos simulados según resultado de prueba de mezclas de carbón en la unidad N°5.

Ordenando los datos por orden decreciente del Consumo Específico, es posible construir la siguiente gráfica.

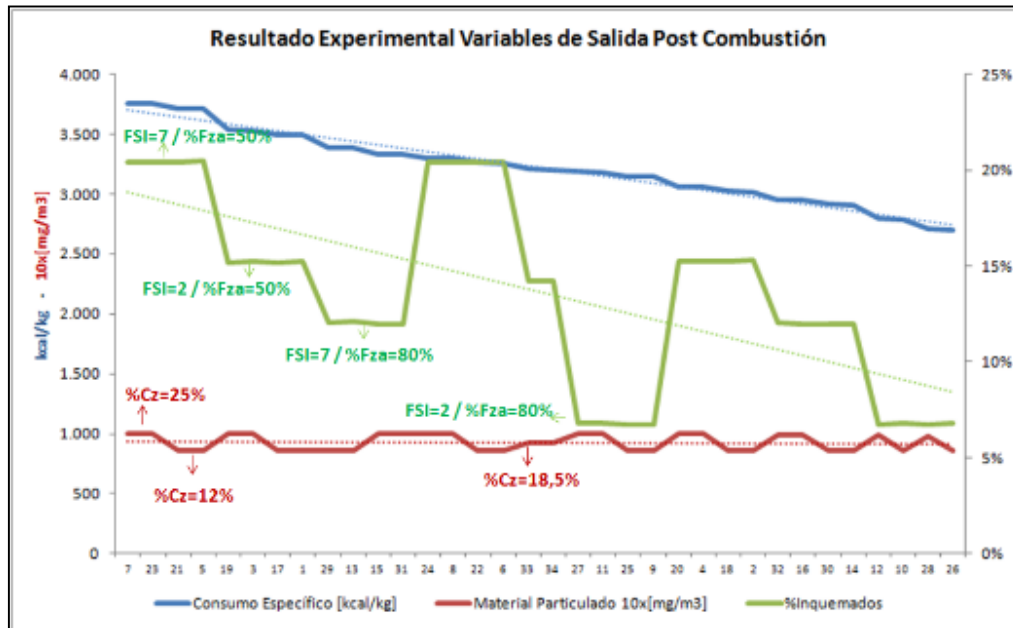


Figura N° 83. Gráfica de Resultado Experimental de Variables de Etapa Post Combustión del Carbón. (Elaboración propia, 2014)

En la gráfica anterior se han incorporado los niveles de los factores cuyos cambios tienen relación con el resultado de las variables de salida. En el caso del Porcentaje de Inquemados, se observa que los factores que tienen una influencia importante en su resultado son el Porcentaje de Fineza con una relación indirectamente proporcional y el Índice de Hinchamiento con una relación directamente proporcional.

Por otro lado se observa que el Material Particulado depende principalmente del Porcentaje de Ceniza del Carbón de Consumo con una relación directamente proporcional.

Otras conclusiones que se desprenden de la gráfica anterior son:

- Para los distintos porcentajes de mezclas efectuados entre Carbón de la Pila N°2 y el Carbón Mixto del proveedor MILPA no se obtuvieron valores excedidos por sobre el exigido por la norma para el Material Particulado.
- El valor más elevado de Material Particulado fue de 100 mg/m³ para una mezcla de 60% carbón de la Pila N°2 con 40% carbón mixto. (Corrida de Prueba N°31 del experimento).
- Si bien el Porcentaje de Inquemados es el parámetro que más efecto tiene en las pérdidas monetarias calculadas por el método VACE en la gráfica se observa que este no explica de manera importante el comportamiento del Consumo Específico, es decir se observa a simple vista que no hay un grado de correlación importante. Lo anterior se explica en la misma gráfica donde se evidencia que el Porcentaje de Inquemados depende

mayoritariamente del Porcentaje de Fineza y del Índice de Hinchamiento del carbón de consumo, factores que si bien son significativos en el resultado del Consumo Específico, no son los principales ya que como se demostró en análisis del DOE, el factor más significativo en el resultado del Consumo Específico corresponde al Poder Calorífico del carbón de consumo.

- Respecto al punto anterior, se puede concluir que los factores Poder Calorífico Superior, Porcentaje de Fineza, Índice de Hinchamiento y Porcentaje de Ceniza, puestos en orden decreciente, son significativos sobre el resultado del Consumo Específico, es decir en términos de Calor necesario para Generar Energía Eléctrica y por lo tanto en la Eficiencia de la Unidad de Generación, sin embargo el mayor componente de pérdidas del proceso correspondiente a Porcentaje de Inquemados tiene relación con cantidad de carbón que no se aprovecha y no con el calor que es capaz de producir.

El gráfico N°83 refleja que las causantes de Inquemados y por lo tanto de las mayores pérdidas en el proceso, son el Porcentaje de Fineza y el Índice de Hinchamiento, siendo posible controlar el primer factor por medio de medidas correctivas operacionales nombradas en la matriz FMEA y el segundo factor solo puede controlarse introduciendo barreras de entrada a proveedores que presenten valores altos y alta variabilidad en las entregas para este factor.

Para el caso del Índice de Hinchamiento, una medida correctiva posible es introducir restricciones en las cláusulas contractuales de provisión del carbón e incentivos a proveedores que entreguen valores bajos de FSI, sin afectar el poder calorífico, es decir manteniendo el poder calorífico en valores altos.

Un muy buen ejemplo de proveedores que entregan el carbón requerido, considerando los datos históricos de ingreso de carbón con Poder Calorífico promedio de 6900 kcal/kg, pero con niveles bajos y con baja variabilidad de FSI (Valores entre 1 y 2), son los proveedores N°1630 y N°1650, lo cual demuestra que es posible aplicar esta mejora ya que el producto que se necesita se encuentra en el mercado.

Otras mejoras de menor grado para controlar los altos valores del Índice de Hinchamiento en el carbón de ingreso, es reducir la variabilidad que muestran la mayoría de los proveedores, según lo que observamos en la Figura N° 74. Gráficas de Caja para el análisis de variabilidad en el Índice de Hinchamiento de los distintos proveedores., donde se destacan en color azul los proveedores con alta variabilidad para el valor medio de FSI mensual equivalente del carbón entregado, donde es posible aplicar el criterio de que si estos proveedores son capaces de entregar algunos meses carbón con bajo índice de hinchamiento, entonces es posible exigir que las entregas futuras se adapten o tiendan a estos valores en el futuro, para lo cual habría que descartar que esta nueva restricción no acarree un cambio significativo en el poder calorífico de ingreso, ya que es posible que estos proveedores actualmente mezclen su carbón mineral de menor poder calorífico al exigido con el Coque que producen en las mismas minas de extracción del mineral, lo cual les permitiría cumplir con la alta exigencia de

poder calorífico que estipulan los contratos actuales (6.900 Kcal/Kg), condición que si cuenta con penalización en caso de entregas inferiores a este valor.

Complementando la propuesta anterior, una posibilidad es reestructurar el procedimiento de asignación de cuotas a proveedores y estudiar reducir la exigencia contractual de 6900 kcal/kg a un valor inferior pero cercano para los proveedores que presentan mayor variabilidad en el FSI entregado históricamente.

Lo anterior con el propósito de desincentivar a que los proveedores busquen aumentar el poder calorífico con un carbón que aporte más FSI, pero que a su vez al mezclar el carbón de estos proveedores en su condición natural de extracción en la pila de acopio, junto con el carbón de otros proveedores provenientes de minas cuya característica es de poder calorífico superior a 7000 kcal/kg, con bajo índice de hinchamiento, como por ejemplo el carbón aportado actualmente por los proveedores 1630 y 1650, entonces se obtenga un carbón resultante en la pila igualmente alto en poder calorífico pero con menor FSI.

Para lograr esto, es necesario redefinir las cuotas de entrega mensuales aumentando los aportes de proveedores con alto Poder Calorífico y bajo Índice de Hinchamiento y reduciendo las cuotas de proveedores que entreguen menor Poder Calórico y mayor FSI.

8.3 Obtención del grado de Degradación en el Poder Calorífico del Carbón almacenado a la intemperie en Pilas del Patio de Acopio.

Estudiar la magnitud del efecto de la degradación del carbón almacenado sobre las características del carbón surge debido al potencial efecto que pudrían tener los factores climáticos, especialmente la lluvia sobre el carbón almacenado en el patio, principalmente durante la temporada de mayores precipitaciones en la zona, la que ocurre históricamente en dos trimestres, correspondientes a los meses de Marzo a Mayo y de Octubre a Diciembre, según la Figura N°81. Siendo estas las temporadas en las que a su vez se tiene una menor producción de energía por parte de las centrales térmicas, induciendo a una mayor acumulación de carbón en el patio y a su vez a una mayor exposición a efectos climáticos del mineral.

Efectuar seguimiento del comportamiento de las características del carbón acopiado durante un tiempo apropiado permitirá establecer si los factores climáticos son significativos en la reducción del poder calorífico del carbón acopiado y posteriormente consumido, parámetro que es el de mayor relevancia en la variación del consumo específico, según el análisis que ya hemos realizado.

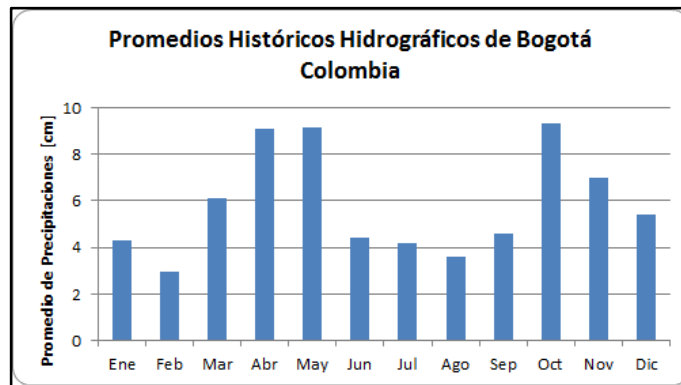


Figura N° 84. Gráfica de Promedio mensual de precipitaciones en Bogotá-Colombia. (Microsoft. Aplicación para windows 8, 2014)

Actualmente en la central “Ejemplo” no se considera relevante la degradación del carbón, no existiendo controles implantados para medir la calidad del carbón almacenado y estudios que descarten la importancia de este fenómeno. Se asume que el carbón mantiene sus características desde que se ingresa a la pila y se efectúa el análisis de laboratorio hasta que es consumido por las unidades de generación.

Esta situación se pudo verificar en nuestro reconocimiento del proceso al verificar en terreno que las entregas de carbón en el patio que no se efectúa siguiendo la estructura FIFO (Fisto input fiesta output), es decir las cantidades de carbón que ingresan primero al patio debieran ser las primeras en consumirse, para evitar o mitigar la degradación de en la calidad lo cual no ocurre en la práctica.

Así como se mencionó en el punto Descripción de las etapas del proceso Gestión del Combustible. , actualmente la central cuenta con dos pilas de acopio a la intemperie y si bien parte de las tareas relevantes en el procesos es mantener una adecuada compactación de las pilas a medida que ingresan al patio las cantidades definidas como cuota mensual para cada uno de los proveedores y también a medida que se extrae el carbón de la pila para el consumo de las unidades de generación, es necesario efectuar un análisis del comportamiento de la degradación del carbón en cada una de las pilas que es provocada principalmente por las lluvias abundantes típicas del clima de la región.

El estudio realizado consistió en seleccionar 35 toneladas recién ingresadas de cada pila (1 y 2), dejarlas apiladas, compactadas y demarcadas en una zona seleccionada en el patio de carbón, para luego mensualmente tomar muestras en distintos puntos de las pilas y efectuar mediciones en el laboratorio del poder calorífico superior equivalente mensual de cada una. La prueba se efectuó durante los meses de Enero y Diciembre del año 2013.



Figura N° 92. Conformación de pilas de prueba para medir la degradación del Carbón acopiado a la intemperie en el patio de la central. (Elaboración propia, 2014)

Los resultados obtenidos para las Pilas N°1 y N°2, se muestran en la siguiente gráfica.

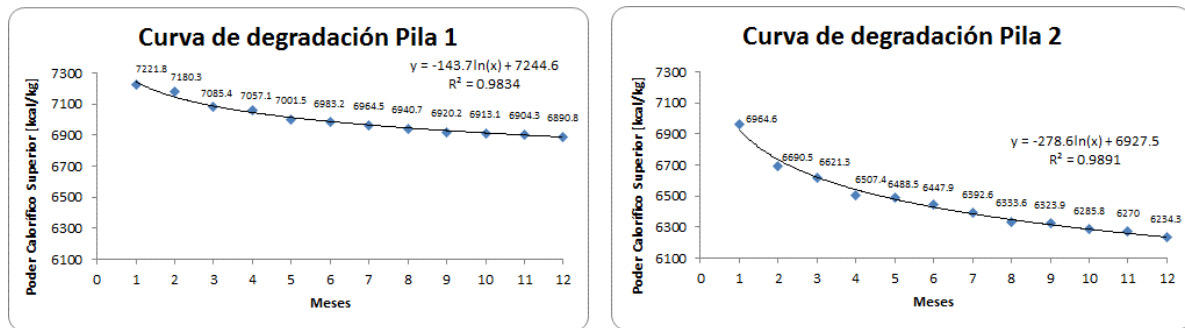


Figura N° 85. Gráfica de degradación del poder calorífico superior del carbón acopiado a la intemperie en pilas 1 y 2 de la central. (Elaboración propia, 2014)

Como resultado de este análisis, podemos deducir:

- En ambas pilas se observa un efecto importante de la degradación del poder calorífico durante los primeros meses, decayendo de forma logarítmica en ambos casos de acuerdo a las funciones encontradas en ambas pilas.
- La pila 1, la cual concentra a los proveedores que entregan las mejores calidades de carbón, destinadas al consumo de la unidad de generación N°2, muestra una degradación en el tiempo menor en comparación con los resultados obtenidos para la pila 2.
- La degradación es de una magnitud tal que la Pila 1, la cual se degrada con mayor retardo, al cabo de un año disminuye su poder calorífico a un valor similar al de las propiedades definidas para la Pila 2. Es decir las pilas cambian notoriamente su característica de poder calorífico al estar expuestas durante un periodo prolongado a la intemperie.

- El resultado de la prueba de degradación efectuada, corresponde a una muestra para la condición climática particular que se tuvo durante el desarrollo de esta tesis. De ninguna manera las curvas obtenidas son concluyentes para estudios posteriores ya que el resultado depende de la temporalidad (cantidad de lluvia caída, viento, humedad ambiental, etc), la cual varía. Para obtener un estudio acabado del efecto del clima sobre las características del carbón acopiado en el patio de la central Ejemplo, se debería efectuar un análisis más profundo que implique poder modelar situaciones climáticas probables, lo cual no se abordará en esta tesis ya que nuestro propósito se ha cumplido con la prueba efectuada, en la que hemos demostrado que la degradación si es un factor importante a controlar en las etapas de acopio y consumo del carbón en la central Ejemplo, análisis que servirá para determinar las contramedidas necesarias para evitar la degradación y que será parte de los “inputs” elaborar las evaluaciones económicas en cuanto los costos necesarios y beneficios o ahorros potenciales que aportarían las contramedidas.

8.4 Propuesta de acciones correctivas (Contramedidas) y controles a incorporar al procesos. Elaboración del Plan de Acción y Plan de Control para la implementar las propuestas.

Una vez que hemos obtenido la condición del proceso mejorado (con datos simulado), probado experimentalmente en el punto óptimo de funcionamiento del proceso (con datos simulados), y además se han demostrado estadísticamente las hipótesis y se han analizado las diferentes causas de desvíos de los factores críticos corresponde en esta etapa decidir cuáles serán las acciones correctivas sobre los factores críticos de cada una de las iniciativas contempladas en el alcance de este trabajo de manera de llevar al proceso desde la condición actual encontrada a la condición de mejora obtenida, considerando también que algunas acciones correctivas serán comunes para ambas iniciativas.

Es importante destacar que la implantación de la acciones correctivas no será parte de este trabajo de tesis, no obstante se considera entregar un plan de acción para ejecutar las acciones correctivas y otro plan de acción para incorporar los posibles controles de las variables críticas con una serie de recomendaciones para que las acciones a implantar sean incluidas de manera efectiva y estandarizada en el proceso como parte de la mejora continua a modo que sea sostenida en el futuro.

Para la construcción del plan de acción con las acciones correctivas cuya implantación modificarán la forma de ejecutar el trabajo en la central “Ejemplo” y por tanto significará una transformación en distintos aspectos del proceso. El primer paso consiste en determinar los principales grupos de acción o contramedidas las que se agruparan a la vez en una serie de acciones correctivas, lo anterior con el propósito de asegurarnos que los problemas globales más relevantes sean detectados durante las etapas anteriores y puedan ser cubiertos en el plan de acción.

En la siguiente tabla se mencionan las Contramedidas para las dos iniciativas abordadas por este trabajo de tesis.

Tabla N° 49. Contramedidas propuestas para implementar mejoras que implican transformaciones en las etapas del proceso.

INICIATIVA	CONTRAMEDIDA / MEJORA PROPUESTA
Y1. Reducción del costo variable unitario del combustible utilizando mezclas de carbón	Mejoras de especificación del carbón de consumo. Estudio del Diseño de Experimento como proyecto piloto de mezclas de carbón.
	Modificar/Ajustar planes de mantenimiento para los equipos comprometidos en la ejecución de mezclas de carbón
	Implementar soluciones de mitigación para efectos adversos causados por exceso de humedad en el carbón de consumo
	Mejoras en el procedimiento de toma de muestras
	Mejoras en la Trituración del Carbón (Triturador primario)
	Mejoras para reducir la alta variabilidad y valores altos de FSI en el carbón suministrado por lo distintos proveedores
	Mejoras operacionales en la etapa de combustión o consumo del carbón
Y2. Reducción del costo variable unitario del combustible mejorando la eficiencia en el consumo de las unidades de generación	Revisión, reemplazo y recuperación de la instrumentación necesaria para controlar el proceso
	Mejora en la trituración del carbón. Triturador secador
	Mejora en el procedimiento de apertura de la clasificadora de retorno de gruesos de carbón
	Mejora en la pulverización del carbón. Implementación de indicador de desgaste de cuerpos moleadores
	Mejoras en la distribución de oxígeno por línea de quemadores y de la conservación en el ciclo agua-vapor
Ambas Iniciativas (Y1 y Y2). Acciones correctivas comunes relacionadas con mejoras operativas en el manejo de patio en la etapa de consumo del carbón	Mejoras operativas en el manejo del patio de Carbón (Gestión de Inventario)
	Mejoras operativas e l etapa de consumo del Carbón
	Mejoras en el control y gestión de inventario de carbón

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en los capítulo 6 y 7 de esta tesis

Luego se debe determinar las distintas acciones correctivas que agruparán cada contramedida, pero previo es necesario explicar que adicionalmente a las acciones correctivas es indispensable considerar otras actividades importantes bajo el punto de vista de la organización visto como un todo (“Sistema”) en la que se realiza la importancia de las personas y el comportamiento humano considerado como un sistema social, lo que se conoce como “Visión Sistémica” (Carrasco, 2011, págs. 52-58), la que tiene su propio campo de conocimiento que se crea desde otras disciplinas, tales como la antropología, sociología, psicología, todas las cuales aportan a una visión más amplia a la visión antigua “Mecanicista” la cual consideraba a las personas como un recurso similar a una máquina, es decir asumiendo que las personas reciben una instrucción, estas la ejecutan y entregan el producto requerido, situación que es mucho más compleja en la realidad y que es vital para asegurar que en la práctica se lleven a cabo las acciones que se requieren realizar.

8.4.1 Plan de acción de para la implantación de acciones correctivas y plan de control de variables críticas.

Una vez expuestas las contramedidas para efectuar mejoras al proceso de gestión del carbón en la central “Ejemplo” para las dos iniciativas de mejora abordadas en este trabajo de tesis, se propone implementar un plan de acción de mejora, por su extensión se muestra en el Anexo N°5. Plan de medición y control de variables críticas, en él se detalla cada una de las actividades a desarrollar para cada contramedida, el responsable de ejecutar cada actividad, una ponderación de cada una de éstas con el propósito de poder efectuar un seguimiento del

avance físico global del programa y una carta Gantt con los porcentajes de avance programado en las fechas en que se ha definido el horizonte del proyecto y con la posibilidad de introducir los porcentajes de avance físico real de cada una de las actividades, con el propósito que el Equipo de Trabajo que ejecute la implantación pueda efectuar el seguimiento de avance físico y ejecutar los controles necesarios durante la ejecución del plan.

En la siguiente figura se muestra la gráfica de la curva “S” construida con los porcentajes de avance físico programado y la ponderación asignada a cada actividad a modo de ejemplo. Se muestra una simulación de cómo se vería la curva “S” con el avance físico real, curva que se construiría dependiendo de los resultados de avances reales parciales que se obtengan de manera paulatina para cada actividad.

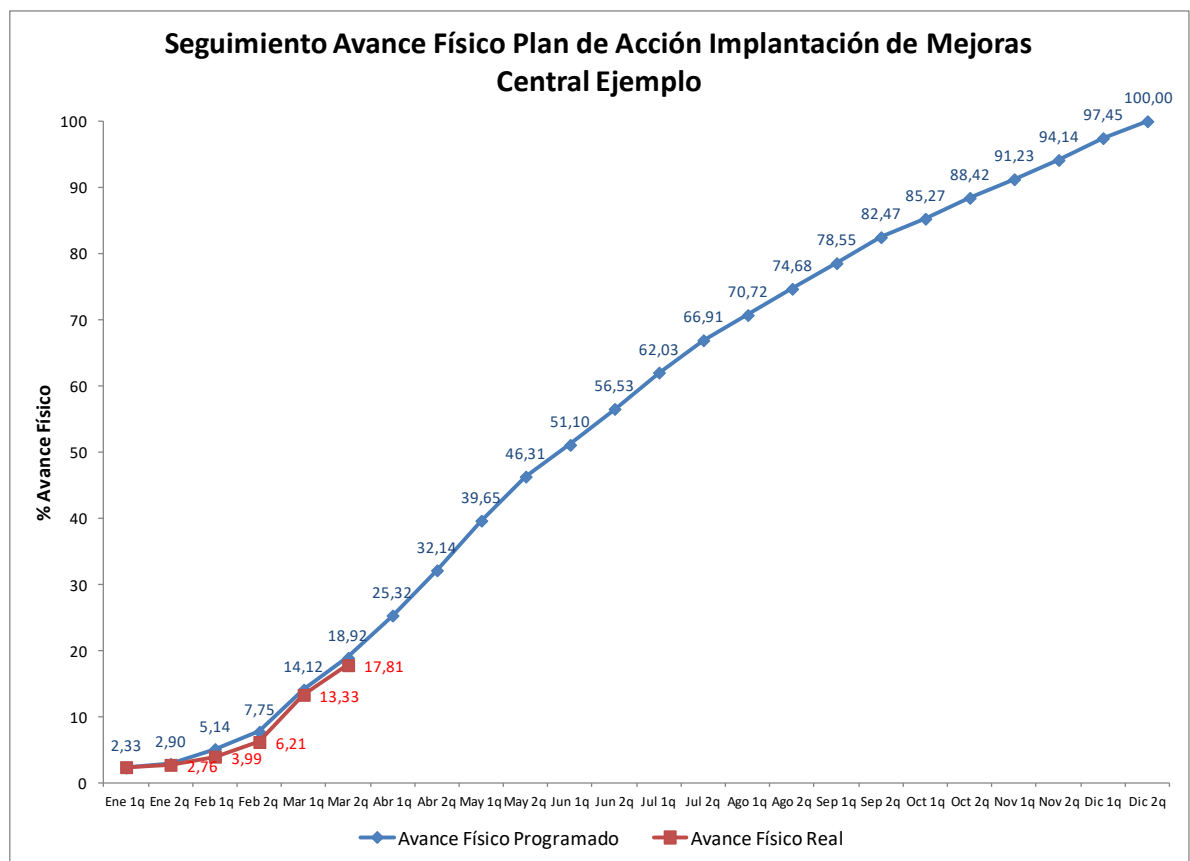


Figura N° 86. Seguimiento propuesto de avance físico del plan de acción para la implementación de mejoras. (Elaboración propia, 2014)

Adicionalmente al plan de acción anterior se propone que paralelamente se implemente el Plan de Control de Variables Críticas que por su extensión se muestra en el Anexo N°5, cuyo propósito es minimizar la variación de las variables del proceso y las actividades y herramientas necesarias para mantener las etapas del proceso controladas, permitiendo tomar acciones proactivas y no reactivas ante la aparición de tendencias y mediciones por fuera del rango aceptable.

Las actividades que se muestran en este último plan no implican transformaciones del proceso, pero en algunos casos si corresponden a actividades de control que no se efectuaban con la frecuencia o con la formalidad de registro necesaria para asegurar que la acción sea proactiva y no reactiva ante la ocurrencia de defectos. El Plan de Control de Variables Críticas se construyó tomando como fuente principal los potenciales modos de fallo encontradas en la FMEA (Anexo N°3. Matriz FMEA), incluyendo las acciones correctivas recomendadas en caso de presentarse desviaciones o tendencias indeseadas en las mediciones obtenidas.

El Plan de Control de las Variables Críticas, se compone de los siguientes campos.

- a) Característica del parámetro. Corresponde a la variable crítica de medir que tiene efecto significativo en el resultado del proceso (Consumo Específico)
- b) Especificación a controlar. Niveles aceptables (Rangos, mínimo, máximo) para la característica del parámetro especificada.
- c) Frecuencia de control. Indica que tan seguido debe efectuarse la medición para asegurar que el control sea efectivo y garantice que los ajustes necesarios en caso de obtener desvíos se ejecuten antes de que el proceso tenga resultados indeseados.
- d) Nombre del responsable de ejecutar el control.
- e) Referencia del documento o sistema donde se Registra la ejecución del control y donde se almacenan los datos obtenidos.
- f) Acción correctiva a ejecutar en caso de que durante el control se detecten valores fuera del rango aceptable.

Para que el Plan de Control sea utilizado correctamente por las personas que ejecutan las actividades clave del proceso, se recomienda diseñar un sistema de tableros ubicados en puntos estratégicos de la Central “Ejemplo”, de manera de mostrar de manera gráfica las mediciones obtenidas durante la rutina o turnos en las distintas etapas del proceso, las que sean obtenidas y analizadas por el propio personal que ejecuta la acción.

Una herramienta de control estadístico de procesos muy útil para el tipo de datos (variables continuas) que se requieren controlar en el proceso son las Gráfica de Control con Series de Tiempo, con la que es posible evaluar los patrones y el comportamiento de los datos en el transcurso del tiempo, ya que muestran las observaciones en el eje vertical con respecto a los intervalos de tiempo con igual separación en el eje horizontal.

Un concepto muy importante que incluyen este tipo de gráficas son los Límites de Control, los que deben ser más exigentes que los Límites de Especificación Técnica, esto con el propósito de tener la oportunidad de poder efectuar acciones proactivas y no reactivas en caso de observar algún desvíos o tendencias que muestren superación de los límites de control. Esto es usado como primera barrera de control y así permite asegurar el no sobrepasar los límites de especificación del proceso.

La siguiente figura muestra a modo de ejemplo una gráfica de control de serie de tiempo, con sus componentes principales.

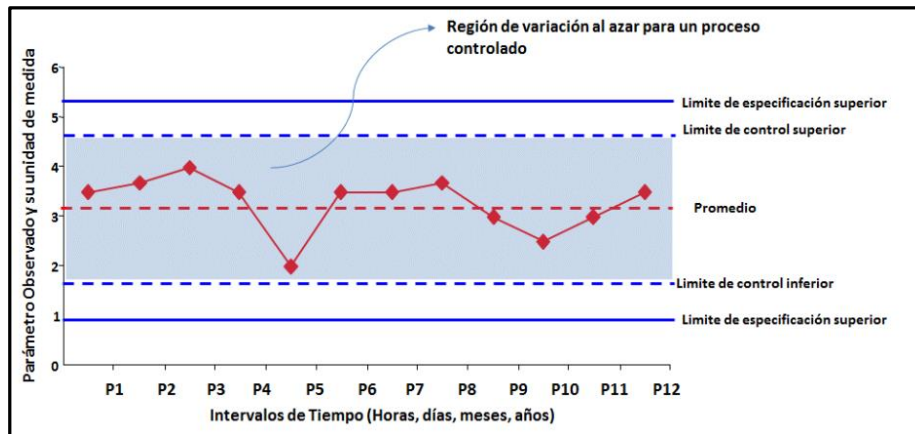


Figura N° 87. Ejemplo de gráfica de control de serie de tiempo. (Elaboración propia, 2014)

Es importante enfatizar que en la etapa de implementación de las mejoras se utilice el apoyo de la Gestión Visual para controlar los indicadores operacionales o de resultados del proceso, por lo que recomendamos implementar tableros o pizarras con el formato de graficas ya impreso o estampado para que los operadores puedan ir completando los datos obtenidos para cada período, por ejemplo en cada turno de manera que las personas que ingresan al nuevo turno observen el estado de situación de las variables del proceso e inmediatamente puedan elaborar una estrategia para mantener o corregir la tendencia de los resultados obtenidos.

8.5 Evaluaciones económicas, con potenciales beneficios a obtener para la condición del proceso mejorado.

Una vez completado el análisis realizado en los puntos 5.4.3 y 5.4.6 del presente trabajo, es posible cuantificar todos los beneficios económicos potenciales relacionados en gastos e inversiones de las dos iniciativas abordadas en el trabajo de tesis, considerando que todos los análisis y resultados recogidos de la etapa “Analizar” más los resultados de los experimentos para el proceso mejorado (DOE en Unidad N°5 y Estudio de Degradación del Carbón), efectuados en la etapa “Mejorar”.

Un aspecto importante a señalar es que para las evaluaciones económicas se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los resultados de las evaluaciones son Beneficios Brutos de Explotación, lo anterior con el propósito de medir el potencial impacto sobre el EBITDA de la empresa, es decir no se han considerado los efectos de la depreciación, efecto de impuestos y amortizaciones de crédito en caso de modalidades de financiamiento con aportes externos.
- Las evaluaciones se basan en los criterios y políticas utilizadas por la empresa para el proceso de selección de inversiones. Sobre esto último es importante destacar que el horizonte de los proyectos se toma como el periodo de análisis que utiliza la empresa para el cálculo del Presupuesto Operativo Anual (POA) igual a 9 años, el cual coincide

con la estimación de vida útil de los activos considerados en las evaluaciones, correspondientes a las implementaciones tecnológicas, esto aunque los activos relacionados a nuevas inversiones en procesos productivos de generación, tienen una vida útil estimada de 30 años. Adicionalmente, no se consideran en los flujos el capital de trabajo, ni el valor de desecho de los activos y recuperación del capital de trabajo en el último periodo de evaluación, lo anterior debido a que el valor de desecho se debe calcular como la valorización de flujos futuros de la central eléctrica como un todo y no como la valorización de los activos en stock que forman parte las etapas del proceso, ya que estos no son comercializables en unidades separadas.

- c) La evaluación económica se realiza con el método incremental, es decir considerando solo beneficios, costos e inversiones incrementales por la implementación del proyecto y no todos los que abarca la central o el proceso analizado.
- d) Los flujos de la evaluación económica se representan en Dólares y para los cálculos de beneficios y costos se utilizó la proyección de generación definida en el POA de generación 2014-2023, informado por la Gerencia de Planificación y Control de la empresa, además se utilizó el tipo de cambio (TRM), IPC y la Tasa de Descuento informada por la Gerencia de Planificación y Control de la empresa para cada uno de los años considerados en el horizonte de evaluación, es decir tasa de cambio nominal para cada año de evaluación.

8.5.1 Evaluación económica para Y1: Reducción del costo variable del combustible por medio de la utilización de mezclas de carbón.

En la siguiente figura se muestra el resultado de la evaluación económica para la primera iniciativa abordada en el presente trabajo de tesis.

Las barras en color azul degradado muestran cada uno de los ahorros o ingresos incrementales, mientras que las barras en color gris degradado muestran los costos incrementales y la inversión necesaria, todos los anteriores evaluados para cada periodo del horizonte de evaluación, de acuerdo al nivel de generación esperado, es decir dependiendo del nivel de actividad. El beneficio potencial corresponde al incremento en el EBITDA de la empresa para cada periodo con la implementación del proyecto y se calcula con la ecuación $\text{Beneficios} = \text{Ingresos} - \text{Costos} - \text{Inversión}$, cuyo resultado se muestra en la línea de color anaranjado. Todos los resultados anteriores (Beneficio potencial, ingresos, costos, inversión), se representan en miles de dólares en el eje vertical izquierdo de la figura.

El beneficio potencial acumulado, es igual a la suma incremental de EBITDA de la empresa en cada periodo con la implementación del proyecto, y se representa en miles de dólares en el eje vertical derecho de la figura.

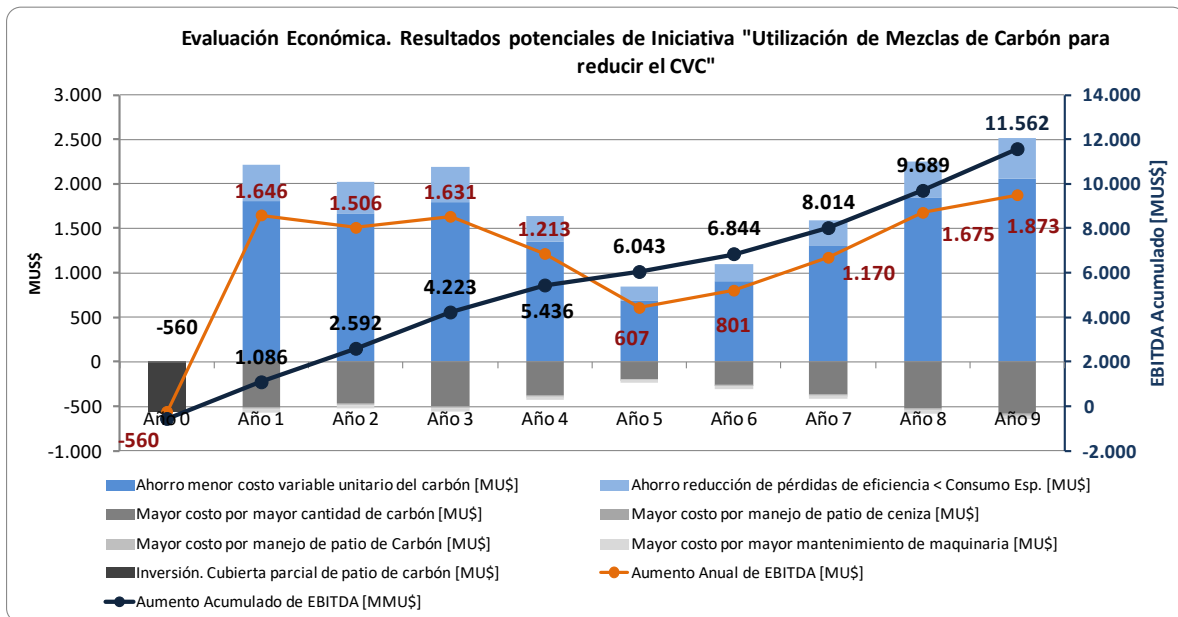


Figura N° 88. Evaluación económica para la iniciativa Y1: "Reducción del costo variable de combustible por medio de la utilización de mezclas de Carbón". (Elaboración propia, 2014)

Los detalles de la evaluación económica, se explican a continuación.

Ingresos-Ahorros.

A continuación se explica los cálculos para el año 0 y el año 1 de la evaluación económica (2014 y 2015 respectivamente). El resto de los flujos se calculan con el mismo criterio del 2015, pero teniendo en cuenta el efecto del Tipo de Cambio (TRM) e IPC.

Ahorro por menor costo unitario del carbón.

- Actualmente el precio que se utiliza en la central "Ejemplo" para calcular el Costo Variable del Combustible de las unidades de generación corresponde al valor del inventario, el que se extrae mensualmente del sistema contable de la compañía a través de plataforma SAP (ERP de la empresa generadora). Este precio se descompone en el Precio de Compra del Carbón puesto en patio de la central (Precio del carbón + Transporte), más el Costo de Manejo de Patio el cual incluye pagos a colaboradores que reciben el carbón (Báscula), efectúan el análisis de calidades entregadas (Toma de muestras, análisis de laboratorio) y realizan el mantenimiento de las pilas.
- El precio unitario del carbón de inventario al momento de efectuar esta evaluación es de 148.000 COP/Ton (Enero 2014).
- El precio cotizado actualmente (Enero 2014), de un carbón de residuo de la industria Coquizadora con Poder Calorífico de 5500 Kcal/Kg, adecuado para efectuar mezclas, es de 70.000 COP/Ton.

- d) Considerando que de las pruebas de mezclas ejecutadas durante Mayo de 2013 en la unidad N°5 de la central Ejemplo, es posible efectuar mezclas de carbón normal con carbón mixto hasta un 60%-40% respectivamente, por lo que se considera un valor conservador de utilización de mezcla de carbones de un 80%-20%, obteniendo entonces un precio unitario actual de inventario $0,8 \times 148.000 + 0,2 \times 70.000 = 132.400$ COP/Ton. Se destaca que la proyección anterior es conservadora ya que actualmente se tiene cotización y opción real de compra de carbón mixto de mejor calidad (5550 Kcal/Kg de Poder calorífico inferior y 20 % de Ceniza) que el residuo utilizado en las pruebas (5096 Kcal/Kg de poder calorífico inferior y 32,81 % de ceniza) y con un precio inferior e igual a 68.000 COP/Ton.
- e) La disminución del precio unitario de inventario utilizando mezclas de carbón es igual a 148.000 (Precio Actual) - 132.400 (Precio proyectado utilizando mezclas) = 15.600 COP/Ton.
- f) Debido a que la limitante principal para la ejecución de mezclas corresponde al material particulado (emisiones) y de acuerdo a los resultados presentados durante las pruebas efectuadas en Mayo de 2013 en la unidad N°5, se considera con un criterio conservador que las mezclas se podrán realizar solo para alimentar las unidades N°4 y N°5 de central Ejemplo, ya que éstas cuentan con los mejores resultados de comportamiento de los precipitadores.
- g) Las proyecciones de consumos para las unidades N°4 y N°5, calculadas de acuerdo a POA de generación para el año 2015, corresponde a 94.463 Ton y 109.440 Ton respectivamente.
- h) Se considera que la generación total proyectada para las unidades 4 y 5 podrá ejecutarse utilizando mezclas de carbón. Se aclara lo anterior debido a que el carbón mixto utilizado en la mezcla tiene baja granulometría y que en la condición actual de acopio a la intemperie, se podrían presentar problemas de atascamiento en ductos en el proceso de molienda durante temporadas húmedas (lluvia) , restringiendo la utilización de mezclas, pero el proyecto propone efectuar una inversión inicial en el año 0 (2014), para la construcción de una cubierta que cubra 10.000 Ton de carbón mixto y así evitar que este se humedezca .

$$\begin{aligned}
 \text{Ahorro proyectado año1} &= [(\text{Precio al 2015 del carbón utilizado}) - (\text{Precio al 2015 de la mezcla 80\% carbón - 20\% residuo})] \times \text{Consumo de carbón proyectado año1} \\
 &= [(148.000 \times (1 + \text{IPC } 2014:0,034) \times (1 + \text{IPC } 2015:0,033)) - (0,8 \times (148.000 \times (1 + \text{IPC } 2014:0,034) \times (1 + \text{IPC } 2015:0,033))) + 0,2 \times (70.000 \times (1 + \text{IPC } 2014:0,034) \times (1 + \text{IPC } 2015:0,033))] \times \\
 &\quad (94.463 + 109.440) \\
 &= 3.397.566.066 \text{ [COP]}
 \end{aligned}$$

Ahorro por reducción de pérdidas de eficiencia utilizando mezclas de carbón.

De las pruebas de mezclas ejecutadas en mayo de 2013 en la unidad N°5 se obtuvo como resultado una disminución promedio del consumo específico de 218,8 Kcal/Kg (reducción del 7% del consumo específico a plena carga equivalente a 3086,7 Kcal/Kg, según nueva línea base de la unidad N°5), para una mezcla de carbón con el porcentaje considerado para ejecutar esta evaluación económica (80% Carbón normal - 20% Carbón mixto), con una calidad de residuo utilizado de 5096 Kcal/Kg de poder calorífico inferior y 32,81 % de ceniza.

Según el análisis realizado la disminución del consumo específico se debe principalmente al control de las variables operacionales relevantes del proceso de combustión, los que hoy en día requieren de una supervisión y actuación permanente del personal de operación y carece de automatismos que regulen dichos parámetros. Adicionalmente se tiene que como resultado de la mezcla de carbón se reduce el alto índice de aglomeración que posee el carbón utilizado actualmente, lo que se traduce en una disminución de pérdidas de eficiencias debido a varios factores, entre los que se destaca la reducción del porcentaje de inquemados.

A continuación se describe el cálculo de este ahorro.

- a) Como los resultados variaran dependiendo de las calidades del carbón mixto a utilizar, para la proyección se estima con criterio conservador, que se utilizará una mezcla 80% Carbón y 20% residuo y que con esta se logrará una disminución del consumo específico de 80 Kcal/Kg en cada unidad donde se ha considerado factible la ejecución de mezclas. Reducción del 2,5% promedio para las unidades 4 (3161,7 Kcal/Kg) y 5 (3086,7 Kcal/Kg)
- b) La proyección de generación para el año 1 (POA 2015) indica una energía generada total para la unidad N°4 de 181.800 MWh y 210.300 MWh para la unidad N°5, con un total de 392.100.000 kWh para ambas unidades.
- c) El costo unitario actual de inventario es 148 COP/kg
- d) El poder calorífico inferior actual ponderado del carbón es 6.550 Kcal/Kg.

Resultado:

Reducción del consumo específico (80 [Kcal/kWh]) x Energía proyectada en POA a generar para el 2015 U4 y U5 (392.100.000 [kWh]) x Precio unitario de inventario el 2015 (148 [COP/Kg]*(1+ IPC 2014:0,034012)x(1+IPC2015:0,032983)) / Poder Calorífico ponderado del carbón utilizado actualmente(6550 [Kcal/Kg]) = **757.052.659 COP/año**

Gastos – Costos

Incremento de costo por mayor consumo de cantidad de carbón, debido al menor poder calorífico de la mezcla.

Es sabido que la mezcla a utilizar tendrá un poder calorífico inferior al que actualmente tiene en promedio ponderado del carbón utilizado en la central "Ejemplo", esto tendrá como resultado que para generar el mismo calor que requiere la caldera se deberá utilizar una mayor masa de carbón, es decir se proyecta consumir una cantidad mayor a la estimación calculada para el 2015 con el POA de la empresa generadora, el cálculo de este mayor consumo se considera negativamente en la evaluación como un mayor costo.

El mayor consumo de cantidad de carbón referido en porcentaje de la cantidad utilizada actualmente se calcula como:

Calor requerido por la caldera:

$$Q = mc \times PCI \text{ [Kcal]}$$

Dónde: mc es masa en Kg y PCI es Poder Calorífico Inferior en Kcal/Kg.

El poder calorífico inferior (promedio ponderado), del carbón consumido actualmente es PCI a = 6550 Kcal/Kg.

El poder calorífico inferior, del carbón mixto que se utilizará es de PCIr = 5500 Kcal/Kg, según datos de cotizaciones efectuadas.

El poder calorífico inferior, de la mezcla proyectada es $PCI_m = 0,8 \times 6550 + 0,2 \times 5500 = 6340$ Kcal/Kg

Como se requiere conseguir el mismo calor que requiere la caldera, se tiene:

$$Q_{\text{actual}} = mc_{\text{actual}} \times PCI_a \text{ [Kcal]}$$

$$Q_{\text{mezcla}} = mc_{\text{mezcla}} \times PCI_m \text{ [Kcal]}$$

$$Q_{\text{actual}} = Q_{\text{mezcla}}$$

$$mc_{\text{actual}} \times PCI_a \text{ [Kcal]} = mc_{\text{mezcla}} \times PCI_m \text{ [Kcal]}$$

$$mc_{\text{mezcla}} = (6550/6340) \times mc_{\text{actual}} = 1,0331 mc_{\text{actual}}$$

"Se espera consumir un 3,31 % más de carbón".

Resultado:

Precio de mezcla para el año 2015 (141.419 COP/Ton) x Sobreconsumo proyectado [(94.463 + 109.440) x 3,31%] x % de Generación esperada utilizando mezclas (100%) = **954.463.425 COP/Año**

Incremento de costo por mayor operación de patio de ceniza, debido al aumento de la cantidad de carbón consumida.

Es sabido que la mezcla a utilizar tendrá menor poder calorífico en comparación al carbón utilizado actualmente, por lo tanto se espera que tenga un mayor porcentaje de ceniza y por ende un mayor costo por concepto de manejo de patio de ceniza.

La ceniza producida de acuerdo a las proyecciones de consumo de carbón se calculan como:

Ceniza [Ton] = Consumo de Carbón [Ton] x % de ceniza en el carbón / % de Ceniza en Cenizas.

Donde:

Consumo de Carbón [Ton]: Se calcula tomando como base el ejercicio la proyección de consumo mensual para el 2014, para luego obtener un cálculo estimado para los años futuros, utilizando el factor de utilización, como se explicará en los siguientes párrafos. Para la evaluación se considera el caso sin proyecto versus el caso con proyecto de mezcla, considerando proyecta consumir un 3,31% más de carbón.

% ceniza en el carbón: Es el % de ceniza presente en el carbón o mezcla a consumir medido en laboratorio.

% cenizas en cenizas: Es el % de cenizas que se obtiene cuando ocurre la combustión.

Utilizando las cláusulas contractuales para el pago de servicios en patio de ceniza, se efectúa un análisis para los pagos mensuales proyectados con y sin proyecto, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 50. Estimación del costo de operación del Patio de Ceniza en COP, con y sin proyecto.

	ene-14	feb-14	mar-14	abr-14	may-14	jun-14	jul-14	ago-14	sep-14	oct-14	nov-14	dic-14
Consumo de carbón U2 y U3 según POA [Ton]	26.806	25.659	27.025	20.407	5.556	3.910	2.895	3.424	6.929	4.853	3.235	9.387
Consumo de carbón U4 y U5 según POA [Ton]	36.088	29.643	31.613	31.356	9.446	5.431	2.265	10.616	13.542	15.975	7.700	10.760
% Ceniza en el carbón actual	12,47%	12,47%	12,47%	12,47%	12,47%	12,47%	12,47%	12,47%	12,47%	12,47%	12,47%	12,47%
% Ceniza en el residuo a utilizar	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%
% Ceniza proyectada en la mezcla 80-20 para U4 y U5	13,98%	13,98%	13,98%	13,98%	13,98%	13,98%	13,98%	13,98%	13,98%	13,98%	13,98%	13,98%
% de inquemados en el carbón actual	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%
% de inquemados proyectados en la mezcla	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%
% de Ceniza en Cenizas proyectada en la mezcla para U4 y U5	76,02%	76,02%	76,02%	76,02%	76,02%	76,02%	76,02%	76,02%	76,02%	76,02%	76,02%	76,02%
% de Ceniza en Cenizas proyectada sin mezcla para U4 y U5	72,53%	72,53%	72,53%	72,53%	72,53%	72,53%	72,53%	72,53%	72,53%	72,53%	72,53%	72,53%
Ceniza proyectada en la mezcla [Ton]	11.463	10.041	10.650	9.464	2.749	1.704	928	2.605	3.763	3.868	2.019	3.657
Ceniza proyectada sin mezcla [Ton]	10.813	9.508	10.082	8.900	2.579	1.606	887	2.414	3.520	3.581	1.880	3.464
Costos manejo patio cenizas con proyecto [COP]	111.218.022	104.111.938	107.156.867	101.223.770	62.149.333	53.052.012	42.968.775	61.139.810	69.247.110	69.983.185	57.035.696	68.507.331
Costos manejo patio cenizas sin proyecto [COP]	107.971.390	101.445.100	104.312.865	98.402.844	60.959.612	51.781.714	42.438.861	59.802.678	67.541.530	67.971.149	56.346.547	67.152.094

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Endesa Colombia, 2014)

El monto anual proyectado para el ejercicio 2014 con y sin proyecto, se calcula sumando los montos mensuales proyectados para pago durante el 2014 para ambas alternativas y luego restando los resultados totales anuales para determinar el mayor costo:

Costo proyectado del patio de ceniza con proyecto [COP/Año] = suma de costos mensuales con la utilización de mezcla 80-20.

Costo proyectado del patio de ceniza sin proyecto [COP/Año] = suma de costos mensuales sin la utilización de mezclas.

Mayor costo proyectado 2014 [COP/año] = Costo proyectado del patio de ceniza con proyecto [COP/Año] - Costo proyectado del patio de ceniza sin proyecto [COP/Año].

Para los años futuros se toma el efecto del IPC y un factor de corrección considerando el factor de utilización promedio de las unidades 4 y 5 obtenidos de la proyección de generación de POA.

A continuación se muestra el cálculo del mayor costo proyectado para el año 1 (2015).

Factor de utilización U4 en año 2015 (FU.U4.2015) = Proyección de generación de energía de U4 para el año 2015 / Máxima energía teórica que podría generar la U4 en el año 2015 = 181.800 MWh / (365 días x 24 hrs x 64 MW) = 32,43%.

Factor de utilización U5 en año 2015 (FU.U5.2015) = Proyección de generación de energía de U5 para el año 2015 / Máxima energía teórica que podría generar la U5 en el año 2015 = 210.300 MWh / (365 días x 24 hrs x 64 MW) = 37,51%

Los factores de utilización calculados para el horizonte del proyecto, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 51. Factores de utilización de las unidades de generación para los periodos de evaluación del proyecto.

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Unidad 2	38,93%	40,73%	37,63%	39,74%	27,24%	15,38%	18,94%	26,52%	35,79%	38,93%
Unidad 3	29,05%	29,30%	28,43%	31,31%	23,00%	10,84%	14,38%	18,16%	29,10%	30,30%
Unidad 4	31,16%	32,43%	30,05%	32,31%	23,99%	11,56%	14,94%	20,16%	29,81%	31,89%
Unidad 5	38,96%	37,51%	33,44%	35,31%	25,68%	13,43%	16,91%	24,74%	32,50%	36,15%

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Endesa Colombia, 2014), (Endesa Colombia, 2014)

Factor de Corrección = Promedio (FU.U4.2015/FU.U4.2014 ; FU.U5.2015/FU.U5.2014)

Resultado:

Mayor costo proyectado 2015 [COP/año] = [Costo proyectado patio Cz con proyecto para 2014[COP/Año] x IPC2015 - Costo proyectado patio Cz sin proyecto 2014[COP/Año] x IPC2015] x Factor de corrección (Promedio (FU.U4.2015/FU.U4.2014; FU.U5.2015/FU.U5.2014)).

Mayor costo proyectado 2015 [COP/año] = (937.736.057 - 914.320.938) x 100,17% = **23.455.959 COP/Año**

Mayor costo por mayor operación del patio de carbón debido al aumento de la cantidad de consumo.

Es sabido que la mezcla a utilizar tendrá menor poder calorífico en comparación al carbón utilizado actualmente y en esta misma evaluación ya se estimó que se consumirá 3,31% adicional de carbón con una mezcla de 80% de Carbón Actual y un 20% de Carbón Mixto, esperando conseguir un Poder Calorífico Inferior promedio para la mezcla (PCImezcla), igual a $0,8 \times 6.550 + 0,2 \times 5.500 = 6340$ Kcal/Kg.

El consumo de Carbón en toneladas, se calcula tomando como ejercicio la proyección de consumo mensual para el 2014 según el POA de generación. Para la evaluación se considera el caso sin proyecto versus el caso con proyecto de mezcla, considerando proyecta consumir un 3,31% más de carbón.

Utilizando las cláusulas contractuales para el pago de servicios en patio de carbón, se efectúa un análisis para los pagos mensuales proyectados con y sin proyecto, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 52. Estimación del costo de operación del Patio de Carbón en COP, con y sin proyecto.

	ene-14	feb-14	mar-14	abr-14	may-14	jun-14	jul-14	ago-14	sep-14	oct-14	nov-14	dic-14
Consumo de carbón sin proyecto según POA [Ton]	62.894	55.302	58.638	51.763	15.002	9.340	5.160	14.040	20.471	20.828	10.935	20.147
Consumo de mezcla de carbón con proyecto [Ton]	64.088	56.283	59.684	52.801	15.314	9.520	5.235	14.392	20.919	21.356	11.190	20.503
Costos manejo patio carbón sin proyecto[COP] (ingreso)	125.274.692	116.164.472	120.167.680	111.917.708	65.804.768	55.219.194	45.186.937	64.074.763	74.366.841	74.795.211	58.485.806	73.978.539
Costos manejo patio carbón sin proyecto[COP] (consumo)	134.841.543	122.428.868	127.883.212	116.642.652	49.983.453	40.000.000	40.000.000	48.064.687	60.835.504	61.499.477	41.867.153	60.233.635
Costos manejo patio carbón con proyecto[COP] (ingreso)	126.708.111	117.341.906	121.423.314	113.163.173	66.367.906	55.650.616	45.366.908	64.707.288	74.904.720	75.429.734	58.944.595	74.405.932
Costos manejo patio carbón con proyecto[COP] (consumo)	136.794.576	124.033.122	129.594.040	118.339.598	50.607.527	40.000.000	40.000.000	48.766.086	61.669.215	62.482.988	42.375.900	60.896.094
Diferencia en COP con y sin proyecto	1.433.419	1.177.434	1.255.654	1.245.465	563.139	431.422	179.971	632.524	537.878	634.523	458.790	427.393
Diferencia en toneladas con y sin proyecto	1.195	981	1.046	1.038	313	180	75	351	448	529	255	356
Diferencia COP/Ton	1.200	1.200	1.200	1.200	1.801	2.400	2.400	1.800	1.200	1.200	1.800	1.200

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Endesa Colombia, 2014)

El monto anual proyectado para el ejercicio 2014 con y sin proyecto, se calcula sumando los montos mensuales proyectados para pago durante el 2014 para ambas alternativas y luego restando los resultados totales anuales para determinar el mayor costo:

Costo proyectado patio Carbón con proyecto [COP/Año] = suma de costos mensuales de operación por ingreso y consumos, con la utilización de mezcla 80-20.

Costo proyectado patio Carbón sin proyecto [COP/Año] = suma de costos mensuales de operación por ingreso y consumo, sin la utilización de mezclas.

Mayor costo proyectado 2014 [COP/año] = Costo proyectado patio Carbón con proyecto [COP/Año] - Costo proyectado patio Carbón sin proyecto [COP/Año].

Para los años futuros se toma el efecto del IPC y un factor de corrección considerando el factor de utilización promedio de las unidades 4 y 5 obtenidos de la proyección de generación de POA tal como se calculó en el mayor costo de operación del patio de ceniza.

A continuación se muestra el cálculo del mayor costo proyectado para el año 1 (2015):

Resultado:

Mayor costo proyectado 2015 [COP/año] = [Costo proyectado patio Carbón con proyecto para 2014[COP/Año]xIPC2015 - Costo proyectado patio Carbón sin proyecto 2014[COP/Año]xIPC2015] x Factor de corrección (Promedio (F.U.U4.2015/F.U.U4.2014 ; F.U.U5.2015/F.U.U5.2014)).

Mayor costo proyectado 2015 [COP/año] = (1.973.057.979 – 1.952.132.347)x100,17% = **20.961.207 COP/Año**

Incremento de costo por mayor volumen de mantenimiento de maquinaria pesada, a causa del aumento de la cantidad de carbón de consumo.

La siguiente tabla muestra los mayores costos incrementales de mantenimiento de maquinaria pesada, como causa de la mayor cantidad de carbón a consumir por las calderas de las unidad 4 y 5.

El cálculo se efectuó para el año 2014, los valores del resto de los años para el horizonte de evaluación que se calculan tomando en cuenta el efecto del IPC en moneda local (COP)

Tabla N° 53. Mayores costos de mantenimiento de maquinaria pesada mayor procesamiento de cantidad de carbón. (Endesa Colombia, 2014)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Mayor mantenimiento a cuerpos molidores [COP/Año]	8.272.094	8.544.936	8.826.782	9.117.925	9.418.670	9.729.335	10.050.247	10.381.744	10.724.175	11.077.901
Mayor mantenimiento a Martillos [COP/Año]	4.136.047	4.272.468	4.413.391	4.558.962	4.709.335	4.864.668	5.025.124	5.190.872	5.362.088	5.538.951
Reposición de accesorios de difusores y toberas [COP/Año]	7.238.082	7.476.819	7.723.434	7.978.184	8.241.336	8.513.168	8.793.966	9.084.026	9.383.653	9.693.163
Mayor mantenimiento de deshojlinadores [COP/Año]	15.262.013	15.765.408	16.285.413	16.822.571	17.377.446	17.950.623	18.542.706	19.154.318	19.786.103	20.438.728
Mayor mantenimiento de correas transportadoras de carbón [COP/Año]	10.340.117	10.681.170	11.033.478	11.397.406	11.773.337	12.161.669	12.562.809	12.977.180	13.405.219	13.847.376
Mayor mantenimiento de tolvas de alimentación [COP/Año]	15.510.176	16.021.756	16.550.217	17.096.109	17.660.006	18.242.503	18.844.213	19.465.770	20.107.829	20.771.065
Mayor costo por mayor mantenimiento de maquinaria	60.758.529	62.762.557	64.832.716	66.971.156	69.180.130	71.461.966	73.819.065	76.253.911	78.769.067	81.367.184

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Endesa Colombia, 2014)

De acuerdo a como se muestra en la tabla N° 62, para el año 2015 se espera un incremento de costo de mantenimiento igual a **62.762.557 COP**

Inversión Inicial.

Para mitigar la limitación de la ejecución de mezclas producto del atascamiento en los ductos durante la molienda, por causa de la baja granulometría del carbón mixto utilizado en la mezcla, sumado a la humedad por el efecto de la lluvia sobre la pila acopiada a la intemperie, se propone ejecutar la construcción de un techo que cubra parte del residuo y evite que este último se humedezca.

Para esto, se toma como referencia un diseño elaborado durante el año 2009 (Endesa Colombia, 2009), donde se realizaron especificaciones técnicas para la construcción de una cubierta para 10.000 Toneladas, con un costo actualizado al 204 de USD 560.440

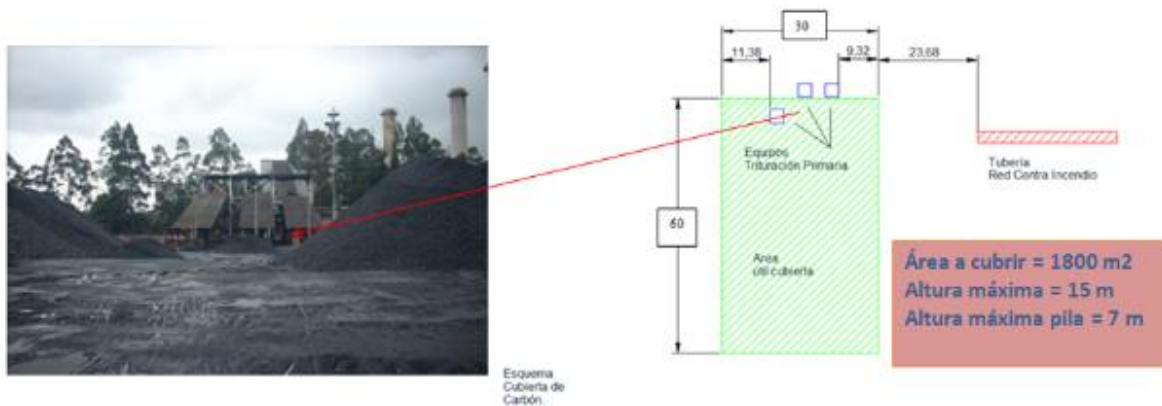


Figura N° 89. Esquema de cúpula o techo para cubrir parte del patio de carbón. (Endesa Colombia, 2009)

La siguiente tabla muestra los flujos de la evaluación económica en Dólares, considerando la tasa nominal para cada periodo y tasa de descuento definida por la Gerencia de Planificación y Control de la compañía.

Tabla N° 54. Tabla de flujos de la evaluación económica de la iniciativa Y1: Reducción del costo variable del combustible por medio de la utilización de mezclas de carbón.

Datos Económicos		Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Moneda	USD										
Tasa Descuento	8,65%										
Tipo Cambio USD a COP		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Horizonte del Proyecto	9	1.845,00	1.878,75	1.921,13	1.955,73	1.978,84	1.998,60	2.018,09	2.037,70	2.059,32	2.080,94
Periodos Flujo	Anual										
Alternativa con inversión:											
Inversión Inicial [USD]											
Cubierta para acopio techado de parte del carbón mixto (Alta fineza)		560.440									
		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Gastos/Costos [USD]		0	-565.080	-521.305	-561.258	-430.101	-239.125	-301.667	-419.734	-580.679	-644.607
Mayor costo por mayor consumo de cantidad de Carbón producto de menor poder calorífico de la mezcla			508.031	465.848	503.537	377.530	194.318	253.278	365.322	518.181	578.461
Mayor costo por manejo de patio de ceniza debido al aumento de cantidad de consumo			12.485	11.464	12.398	9.300	4.780	6.236	8.973	12.805	14.282
Mayor costo por manejo de patio carbón debido al aumento de cantidad de consumo (Inventario + alimentación de tolvas)			11.157	10.245	11.080	8.311	4.272	5.573	8.018	11.443	12.763
Mayor mantenimiento de maquinaria pesada por aumento de cantidad de carbón de consumo			33.407	33.747	34.244	34.960	35.756	36.579	37.421	38.250	39.101
Ingresos/Ahorros [USD]		0	2.211.374	2.027.764	2.191.820	1.643.335	845.831	1.102.480	1.590.179	2.255.566	2.517.947
Reducción de Costo Variable Unitario del Inventario de Carbón			1.808.418	1.658.261	1.792.421	1.343.880	691.704	901.585	1.300.422	1.844.550	2.059.125
Reducción de pérdidas por desvío de Consumo Especifico			402.956	369.503	399.400	299.455	154.127	200.895	289.756	411.016	458.822
Flujos [USD]		-560.440	1.646.294	1.506.459	1.630.562	1.213.234	606.706	800.813	1.170.444	1.674.887	1.873.340

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Endesa Colombia, 2014)
(Endesa Colombia, 2014)

8.5.2 Evaluación económica para Y2: Reducción del costo variable del combustible, mejorando la eficiencia de las unidades de generación.

En la siguiente figura se muestra el resultado de la evaluación económica para la primera iniciativa abordada en este trabajo de tesis.

Las barras en color azul degradado muestran cada uno de los ahorros o ingresos incrementales, mientras que las barras en color gris degradado muestran los costos incrementales y la inversión necesaria, todos los anteriores evaluados para cada periodo del horizonte de evaluación, de acuerdo al nivel de generación esperado, es decir dependiendo del nivel de actividad. El beneficio potencial corresponde al incremento en el EBITDA de la empresa para cada periodo con la implementación del proyecto y se calcula con la ecuación $\text{Beneficios} = \text{Ingresos} - \text{Costos} - \text{Inversión}$, cuyo resultado se muestra en la línea de color anaranjado. Todos los resultados anteriores (Beneficio potencial, ingresos, costos, inversión), se representan en miles de dólares en el eje vertical izquierdo de la figura.

El beneficio potencial acumulado, es igual a la suma incremental de EBITDA de la empresa en cada periodo con la implementación del proyecto, y se representa en miles de dólares en el eje vertical derecho de la figura

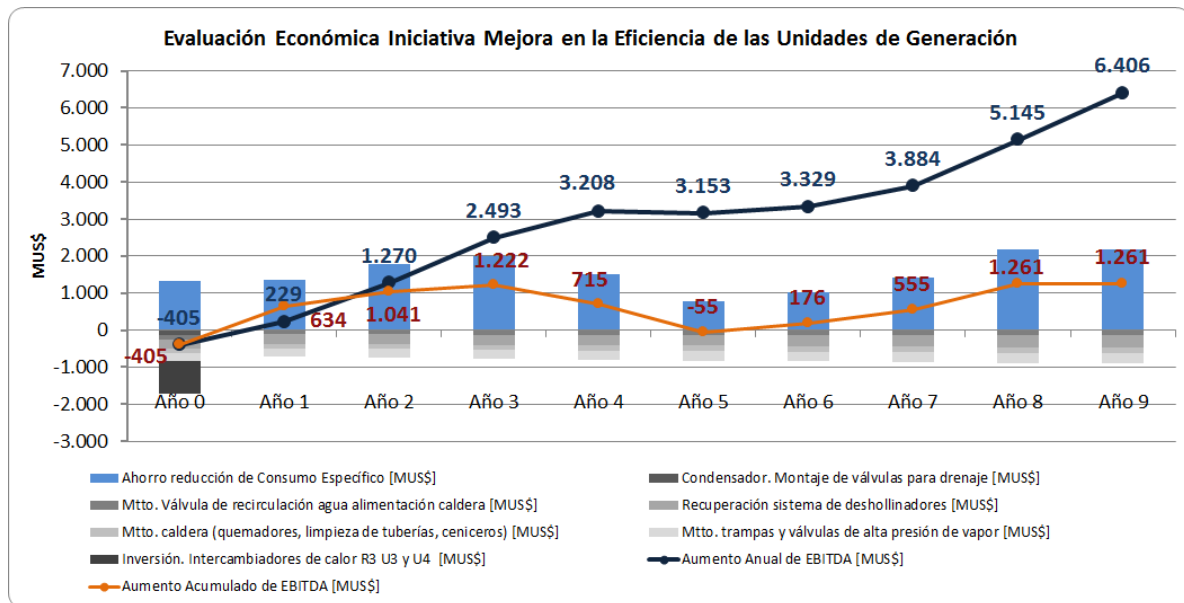


Figura N° 90. Evaluación económica para la iniciativa Y2: “Mejora en la eficiencia de las unidades de generación”. (Elaboración propia, 2014)

Los detalles de la evaluación económica, se explican a continuación.

Beneficios/Ahorros.

Para el cálculo de los beneficios/ahorros analizados y calculados, se cuantifico uno:

- Reducción del Consumo Específico de las unidades 3-4-5 traducidos en disminución de toneladas de carbón en el año.

Para el caso del beneficio a), se calculó el ahorro en toneladas generado en un año a través de la reducción del Consumo Específico de las Unidades 3, 4 y 5. La Unidad 2 no se tomó en este análisis, pues no se considerada para el cálculo en el método VACE por poseer una capacidad instalada inferior a los 50 MW. Para el beneficio potencial calculado, se tomaron como referencia:

- El POA para las proyecciones de generación de las unidades de la central “Ejemplo”, desde el 2014 hasta el año 2023.
- Los valores finales de Consumo Específico de las unidades provenientes del Balanced Scorecard de la central ejemplo “Ejemplo” del año 2012 de la Gerencia de Producción, aprobado por la Gerencia de Planificación y Control. Se tomó la diferencia entre los valores obtenidos ese año y los valores medios de Consumo Específico desde el 2011 al 2013.
- El valor actual de costo de carbón, y para los años futuros, los datos de IPC para el horizonte del proyecto para poder calcular los futuros costos de carbón.

Tabla N° 55. Tabulación de consumos específicos promedio para cada unidad y costo unitario del carbón.

	U3	U4	U5
Valor 2012 BSC Gerencia Producción (kcal/Kwh)	3.448,59	3.300,31	3.342,58
Valor medio actual 2011-2013 (kcal/Kwh)	3.229,78	3.199,60	3.101,42
Poder calorífico inferior (LHV) (kcal/kg)		6.600	
costo de carbón en cop (cop/ton)		148.000	
costo de carbón, tipo de cambio 1.850 (usd/ton)		80,22	

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Área de Operaciones Central "Ejemplo", 2010-2013)

La diferencia de Consumo Específico (CE) de cada unidad se transformó a toneladas de carbón/año con su respectivo total en USD/año, calculado en base al precio actual de inventario del combustible a la fecha de marzo 2014 (148.000 COP/ton). Para los años futuros del horizonte del proyecto, se calculó el precio de inventario afectado por el IPC del cada año del horizonte del proyecto (2014-2023). Desde el año 2016, se propone tomar como valor de referencia la unidad con mejor eficiencia, es decir la unidad 5.

Tabla N° 56. Tabla de cálculo de beneficios económicos de iniciativa de mejora en la eficiencia de las unidades de generación, para capa periodo del horizonte del proyecto.

Beneficio esperado con Delta CE de =		241,16 kcal/kWh								
ton	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Unidad 5	7.980	7.684	6.850	7.234	5.260	2.752	3.464	5.068	6.657	
Total USD	661.933	658.396	606.289	661.375	496.810	268.474	349.069	527.626	715.976	
IPC	3,40%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	
precio carbón	82,9	85,7	88,5	91,4	94,4	97,6	100,8	104,1	107,5	
Beneficio esperado con Delta CE de =		100,71 kcal/kWh						beneficio esperado llevado a U5 delta CE (kcal/kWh)=		
ton	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Unidad 4	2.666	2.774	5.076	5.460	4.053	1.953	2.523	3.405	5.036	
Total USD	221.117	237.689	449.290	499.163	382.749	190.545	254.325	354.516	541.544	
IPC	3,40%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	
precio carbón	82,9	85,7	88,5	91,4	94,4	97,6	100,8	104,1	107,5	
Beneficio esperado con Delta CE de =		218,81 kcal/kWh					beneficio esperado llevado a U5 delta CE (kcal/kWh)=			
ton	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Unidad 3	5.315	5.361	8.253	9.088	6.676	3.146	4.174	5.271	8.448	
Total USD	440.822	459.324	730.479	830.909	630.495	306.944	420.715	548.724	908.515	
IPC	3,40%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	3,30%	
precio carbón	83	86	89	91	94	98	101	104	108	

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Endesa Colombia, 2014) (Endesa Colombia, 2014)

Gastos/Costos.

Los gastos incluidos la evaluación, se orientaron a las acciones más efectivas necesarias para disminuir el indicador de Consumo Específico de las Unidades y principalmente se basan en los ítems antes indicados y analizados relacionados a la reducción de Inquemados, con foco en eliminar o reducir deficiencias en la molienda del carbón y aumento de la presión del condensador con una propuesta de solución para efectuar la limpieza sin tener que sacar de servicio el sistema de agua de enfriamiento y así poder mantener el resto de las unidades en servicio.

- Turbina-condensador cambio de válvulas mariposas (2) y montaje de válvulas 4" para drenaje (2). Cámara frontal inferior para cada condensador. 4 condensadores, uno por unidad de generación. El trabajo consiste en adecuar el Condensador para poder aislarlo del sistema de agua de refrigeración y así poder efectuar su limpieza sin tener que sacar de servicio el sistema completo. **134.504 USD/Año.**
- Válvula de recirculación Agua alimentación Caldera. 4 válvulas, una por cada caldera. Se contempla mantenimiento mayor de una válvula, una vez al año, lo que incluye el reemplazo de partes y componentes principales. **108.570 USD/Año.**
- Mejora sistema de deshollinadores. Se considera el mantenimiento mayor de los deshollinadores de una caldera al año. **248.160 USD/Año.**
- Mantenimiento mayo del hogar de caldera. Se considera el reemplazo de quemadores, limpieza de tuberías y ceniceros de una caldera al año. **124.080 USD/Año.**
- Trampas y válvulas de alta presión de vapor. Se considera el mantenimiento mayor de todas las tramas y válvulas de alta presión de una caldera al año. **217.140 USD/Año.**

Inversión inicial.

En el caso de las inversiones, se proyectó la implementación de dos intercambiadores de calor para reemplazar los intercambiadores actualmente fuera de servicio, en la unidad 3 y la unidad 4 respectivamente, para el año 2014 con un costo de 448.347 USD por cada uno, con el fin de aumentar la eficiencia de las unidades y contar con equipos que entreguen confiabilidad a la operación con buenos niveles de eficiencia.

A continuación se muestra la tabla con flujos resultantes de la evaluación económica en Dólares.

Tabla N° 57. Evaluación económica de la iniciativa Y2: Reducción del costo variable del combustible, mejorando la eficiencia de las unidades de generación.

Datos Económicos										
Moneda	USD									
Tasa Descuento	6,65%									
Tipo Cambio 2014 USD a COP	1.845,00									
Horizonte del Proyecto	3									
Periodos Fijo	Anual									
Alternativa X										
Inversión Inicial (USD)	-836.634									
Inversión Futera (USD)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	-836.634	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intercambiador de calor unidad 3	448.347									
Intercambiador de calor unidad 4	448.347									
Valor residual del activo										
Gastos futuros (USD)	-832.454	-720.982	-744.775	-769.352	-794.741	-820.967	-848.059	-876.045	-904.955	-904.955
Turbina-condensador, cambio de válvulas mariposaz(2) y montaje de válvulas 4" para drenaje (2) . Camara frontal inferior x condensador	134.504									
Válvula de recirculación Agua alimentación Caldera	108.570	112.153	115.854	119.617	123.626	127.706	131.920	136.274	140.771	140.771
Mejora sistema de desbrolladores	248.160	256.349	264.809	273.547	282.575	291.900	301.532	311.483	321.762	321.762
hogar (Trabajo, quemadores, limpias de tuberías, ceniceros)	124.080	128.175	132.404	136.774	141.281	145.930	150.766	155.741	160.891	160.891
Trampas y válvulas de alta presión de vapor	211.140	224.306	231.708	239.354	247.253	255.412	263.841	272.547	281.541	281.541
Beneficios/Ahorros (USD)	1.323.872	1.355.409	1.786.058	1.991.447	1.510.054	765.963	1.024.110	1.430.866	2.166.035	2.166.035
Beneficios/Ahorros de toneladas en el año a través de la reducción del CE Unidades 3-4-5	1.323.872	1.355.409	1.786.058	1.991.447	1.510.054	765.963	1.024.110	1.430.866	2.166.035	2.166.035
Flujos (USD)	-405.276	634.426	1.041.283	1.222.094	715.313	-55.004	176.050	554.821	1.261.081	1.261.081

Fuente: Elaboración propia en base a información recogida de (Endesa Colombia, 2014)
(Endesa Colombia, 2014)

8.6 Obtención de la disminución potencial del precio de oferta de las unidades de la central Ejemplo como resultado de la implantación de las mejoras.

Como se indicó al inicio de este trabajo de tesis es aconsejable que una vez implementadas las mejoras en el proceso de recepción, almacenamiento y consumo del carbón, la empresa evalúe la opción estratégica de reducir el precio de oferta de las unidades de la central ejemplo, según el impacto que provoca la reducción de costos logrados con las iniciativas de mejora en la reducción del Costo Variable de Generación, con el cual se toma la decisión diariamente del precio a ofertar al mercado SPOT, seguido por un análisis de riesgos de las variables externas e internas y las acciones e inversiones que se deben implementar para mitigar el riesgo y tomar dicha decisión como un objetivo estratégico de la empresa.

Para lo anterior, se propone efectuar estimar la reducción del costo variable de generación, utilizando datos históricos reales de las unidades de la central ejemplo, de la siguiente forma:

De acuerdo a lo expuesto en el punto 5.2.2, es posible obtener la diferencia del costo variable de combustible tomando como base los valores obtenidos mensualmente durante el año 2013 y comparándolos con el resultado que se habría obtenido con el Costo Variable Unitario del Combustible “optimizado”, luego de implementar las iniciativas de mejoras, manteniendo constante los costos de operación y mantenimiento (COM) y Otros Costos Variables (OCV) y utilizando los Índices de Consumo disponibles de las unidades de generación. Finalmente se puede calcular el porcentaje de reducción respecto al valor real de

cada mes y luego promediar los resultados de reducción mensuales para obtener un porcentaje promedio anual de reducción.

Y1: Reducción del costo variable del combustible por medio de la utilización de mezclas de carbón.

Como se mencionó en el desarrollo de esta tesis, se considera que solo se ejecutaran mezclas de carbón en las unidades N°4 y N°5. **La reducción del Costo Variable de Generación se estima en 4,6% y 4,7%, respectivamente.**

Y2: Reducción del costo variable del combustible, mejorando la eficiencia de las unidades de generación.

Como se mencionó en el desarrollo de esta tesis, se considera que solo se optimizará la eficiencia de las unidades N°3, N°4 y N°5. **La reducción del Costo Variable de Generación se estima en 1,2%, 0% y 1,1% respectivamente.**

Con la implementación del proyecto de mejora, la reducción total de los costos variables de generación estimados para las distintas unidades son los siguientes:

U2	U3	U4	U5
0 %	1.2 %	4.6 %	5,8 %

Con estos resultados se podrá evaluar la conveniencia de reducir el precio de oferta, por medio del modelamiento de posibles mayores despachos de las unidades al reducir el precio de oferta en una proporción similar a los porcentajes anteriores.

9 Conclusiones y Recomendaciones.

Habiendo culminado las distintas etapas de diagnóstico del proceso, lo cual incluye la levantamiento de la situación actual y su problemática, el análisis de causas raíces, comprobación de hipótesis y cuantificación de los efectos de los principales factores identificados y habiendo también efectuado la planificación de la etapa de implantación de las mejoras detectadas a través de un plan de acción y control propuestos y teniendo en cuenta los potenciales beneficios económicos estimados una vez se implementadas las mejoras, los cuales alcanzan un monto total neto de **17,968 millones de dólares** para los 9 años de horizonte de evaluación, lo cual significa un promedio aproximado de **2 millones de dólares anuales**, podemos concluir que el proyecto de mejora del proceso de adquisición, ingreso, almacenamiento y consumo del carbón en la central Ejemplo, con sus iniciativas de reducción del costo variable del combustible por medio de la utilización de mezclas de carbón mineral con carbones mixtos en un punto óptimo definido en el punto 8.1.7 de este documento y de mejora en la eficiencia de la unidades de generación por medio de un mejor control operacional y reemplazo en activos críticos, es un proyecto recomendable para ser implementado en la central “Ejemplo”. La etapa implantación de las mejoras es viable de ejecutar en cada una de las acciones descritas en los planes de acción y control y que requiere básicamente del compromiso de la alta dirección y las personas que operan en las distintas etapas del proceso así como de las inversiones necesarias para en el proceso para estandarizar las mejoras.

Uno de los logros importantes alcanzados con este proyecto de tesis, fue la obtención de las causas raíces de problemas que aquejaban a la central desde hacía ya mucho tiempo, o como según relatan los propios operadores, “desde que se tiene conocimiento han funcionado las cosas así”, quienes aprenden a convivir con los problemas día a día y lo asumen como parte habitual y condición normal del trabajo y que sin la aplicación de un método simple pero riguroso y con la aplicación de herramientas adecuadas para llevar a cabo cada etapa, no habría sido posible encontrar las verdaderas causas, o dicho de otro modo y como suele compararse, “solo se conocía la punta del iceberg pero no la parte que está debajo del agua”. En este sentido el planteamiento de distintas hipótesis y su obligada demostración o rechazo en la etapa de análisis, hicieron posible el diagnóstico de las causas raíces, despejando variables no críticas en cada etapa del proyecto y haciendo énfasis en el estudio de aquellas que iban apareciendo como críticas para el resultado del proceso.

Otro hecho importante destacable del proyecto fue la preparación detenida de la etapa de “Definición”, dado a que en un principio no estaba definido enfocarse en el costo del combustible, sino que simplemente el propósito era experimentar y aplicar la metodología en los procesos de operación y mantenimiento de la central, para luego enfocarse en los potenciales de mejora más significativos. De esta manera cabe mencionar que no fue fácil dar con la función objetivo y las iniciativas que se debían abordar en este proyecto y que delimitarían posteriormente el alcance del mismo, justamente por la ansiedad de las personas de la central de dar a conocer todos los aspectos mejorables que tienen todos los procesos de la compañía y la costumbre de exponer estos problemas en reuniones extensas, poco resolutivas, donde se discutía y se pretendía establecer de manera inmediata cuales eran las causas de estos

problemas según la opinión de cada experto de las distintas ramas técnicas de la central. En este sentido la captura de datos históricos y el plan de medición de variables de los procesos y el recorrido recurrente del proceso en terreno para levantar el mapa durante la ejecución de la primera etapa de diagnóstico, llevaron a que las discusiones se centraran en hechos demostrables empíricamente y que aflorará la idea cada vez más fuerte de poner el foco de atención en el costo variable del combustible, hecho que se refleja con valioso material de análisis expuesto en la descripción del problema de este trabajo de titulación.

Una conclusión importante que emana de la experiencia obtenida durante la ejecución de este proyecto de mejora y que refuerza lo dicho en el párrafo anterior, es que los procesos son mejorables una vez que se encuentran bajo control estadístico o estables, independiente si la variación es alta o baja, es decir es posible encontrar mejoras una vez que se tiene el proceso monitoreado en sus variables críticas y cuando se observa que las causas de su variación corresponden a las causas naturales de variación o intrínsecas del proceso, tales como por ejemplo la calidad del carbón consumido lo cual es algo profundo del proceso, que ningún operador puede cambiar debido a que se trata de políticas establecidas en contratos de compra y por tanto son propias del proceso, contrariamente a lo que ocurre con las causas especiales tales como descuidos en el control operacional, tales como no aplicar los procedimientos establecidos para la operación y control de las distintas etapas del proceso, así como la falta de cumplimiento del mantenimiento programado y auditorias en los distintos sistemas.

La medición y control de las distintas variables consideradas críticas durante la ejecución de esta tesis y la aplicación de herramientas tales como las gráficas de control, ayudaron de manera significativa a controlar el proceso y así luego poder detectar los factores principales que causan la variabilidad natural en el proceso.

Para dar un ejemplo claro de lo anterior, podemos referirnos a los resultados que muestran en Figura N° 36, Figura N° 38, Figura N° 40 y Figura N° 42 para la variable Consumo Específico de las unidades 2, 3, 4 y 5 respectivamente, donde es posible apreciar que a partir de los primeros meses del año 2013, se produce un cambio significativo del comportamiento de la variable, donde desaparecen los puntos especiales o valores atípicos y el proceso tiende a comportarse de forma estable, debido a las primeras acciones realizadas para detectar y medir las variables críticas, para luego hacer posible efectuar pruebas de combustión de mezclas de carbón en la unidad N°5 y donde se refleja la mejora en la eficiencia y consecuente reducción de inquemados en la Figura N° 32, donde la hipótesis del origen de la reducción se pensaba en un comienzo, se debía al apego a las características de diseño de la caldera, al reducir el alto poder calorífico del carbón de consumo a valores similares a los establecidos en el diseño, pero que sin embargo luego de ejecutar el Diseño de Experimento Estudiado (DOE) se pudo demostrar que el principal factor en la variación del consumo específico es justamente el poder calorífico y que un valor alto de este último repercute positivamente en la eficiencia, pero así también fue posible demostrar que existen otros 3 factores significativos, entre los que se es posible destacar el Índice de Hinchamiento, factor que era desconocido y totalmente desatendido previo a la ejecución de esta tesis, pero que con el DOE se pudo demostrar que un alto valor de este factor es perjudicial a la eficiencia del proceso de Combustión, encontrando una alta variabilidad de este índice en varios de los proveedores de Carbón actualmente con contrato vigente, debido muy probablemente (durante

este estudio no fue posible comprobarlo), a la mezcla de carbón bituminoso con Coque fabricado en las mismas minas de extracción.

De lo anterior también es posible concluir que la reducción de consumo específico experimentado durante las pruebas de combustión de mezclas de carbón en la unidad N°5 en el primer semestre del año 2013, se debieron a la reducción de inquemados producto de la reducción de Índice de Hinchamiento de la mezcla final, respecto a la que habitualmente se consume, además de la aplicación de estrictos controles operacionales establecidos y supervisados por nosotros mismos durante la ejecución de las pruebas.

Otra conclusión de este trabajo de tesis, es que la metodología utilizada y las mejoras detectadas en el proceso de manejo de carbón, pueden ser utilizadas y homologadas en otros procesos similares de otras centrales térmicas de la empresa, por lo que otra recomendación es difundir las lecciones aprendidas en este trabajo de titulación, al resto de la organización que permitió su realización.

Por último, al término de esta tesis hay varios potenciales nichos de mejora identificados y que no fueron abordados en este estudio debido a lo extenso del análisis, pero que aunque han sido comentados durante el desarrollo de esta tesis, queremos enfatizar la oportunidad que existe en abordar mejoras en el proceso de Venta de Energía, evaluando los potenciales beneficios al reducir el precio de oferta de las unidades de generación, a causa de la reducción del costo variable de generación que entrega esta tesis, así también está la oportunidad de mejorar el modelo de inventario del carbón y asignación de cuotas a proveedores, incorporando cláusulas en los contratos que pongan barreras de entrada al carbón con alto índice de hinchamiento y por otro lado premie a aquellos proveedores que entregan carbón con alto poder calorífico y bajo índice de hinchamiento, los cuales existen en el mercado, tienen contrato vigente con la empresa donde se desarrollo esta tesis y fueron destacados en el desarrollo este trabajo.

Asociado a esto último también está la oportunidad de establecer un modelo de compra de carbón según las posibilidades de mezclas que se implementen en las distintas unidades de generación, abriendo la posibilidad de entrada a proveedores de carbones mixtos.

Otra oportunidad no menos importante es la gestión de la pila de carbón almacenada, donde hicimos notar la carencia de controles para evitar la degradación del carbón producto de la alta cantidad de precipitaciones durante dos épocas del año en la zona donde se encuentra emplazada la central, sumada a periodos prolongados de almacenamiento y donde es posible aplicar controles simples de recirculación y monitoreo de las características de calidad del carbón, tales como pruebas de laboratorio periódicas, aplicación del concepto FIFO de teoría de colas en el carbón circulante, así como la creación de un modelo matemático que estime las cantidades disponibles de carbón en cada pila, su antigüedad y el estado de las características de calidad de cada una y como salida entregue la mezcla optima a efectuar para cada unidad de generación según la disponibilidad real o escasas de algún tipo de carbón.

10 Bibliografía.

- Área de Formación Grupo Endesa. (2013). Campus Virtual - Cursos de Capacitación. Santiago.
- Área de Operaciones Central "Ejemplo". (2011). *Diagrama del proceso productivo de la central "Ejemplo"*. Bogotá. Colombia.
- Área de Operaciones Central "Ejemplo". (2010-2013). *Informe diario de operación*. Bogotá. Colombia.
- Área de operaciones Central "Ejemplo". (mayo 2013). *Reporte de resultados de pruebas de mezclas de carbón en la unidad de generación N°5*. Bogotá. Colombia.
- Barbara Wheat, C. M. (2003). *Seis Sigma, una parábola sobre el camino hacia la excelencia y una "Empresa Esbelta"*. Bogotá: Norma.
- Carrasco, J. B. (2011). *Gestión de Procesos (Alineados con la estrategia)*. Santiago: Evolución.
- Combustión industrial. (15 de Junio de 2013). *Combustión industrial*. Obtenido de http://www.combustiónindustrial.com/img/INDICE_DE_HINCHAMIENTO.pdf
- Cuatrecasas, L. (2010). *Lean Management: La gestión competitiva por excelencia*. Barcelona: Profit.
- Dávila, C. F. (2004). *Mejora continua de sistemas de gestion*. Santiago: DNV.
- Dennis, P. (2007). *Fazendo acontecer a coisa certa*. Sao Paulo: Lean Institute Brasil.
- Distral S.A. (1981). Manual de operación y mantenimiento calderas Distral. Bogotá, Colombia.
- División Combustibles. Endesa Colombia. (2013). Informe mensual de pago a proveedores de carbón. Bogotá, Colombia.
- Endesa Colombia. (2014). *Bases contractuales para la operación del patio de carbón y ceniza*. Bogotá.
- Endesa Colombia. (2009). *Bases de licitación servicio de provisión y construcción de cupula metálica en patio de carbón*. Bogotá.
- Endesa Colombia. (2013). *Informe de calculo mensual del Costo Variable del Combustible. Área Bolsa de Energía*. Bogotá. Colombia.
- Endesa Colombia. (2014). *Presupuesto Operativo Anual de Generación para el decenio 2014-2023*. Bogotá.
- Endesa Colombia. (2011). *Resultado de acciones para mejorar la combustión y reducir las emisiones*. Bogotá. Colombia.
- Endesa Colombia. (mayo de 2013). Sistema de gestión integrado. Herramienta informática ISOLUTION. Bogotá, Colombia.
- Grupo Endesa. (2002). *Curso de capacitación para al optimización del consumo específico*. Santiago.
- Grupo Endesa. (2002). *Instrucciones operativas para control y gestión de eficiencia en centrales térmicas*. Santiago.
- Hitachi S.A. (1964). Manual de operación y mantenimiento caldera Hitachi. Bogotá, Colombia.
- Humberto Pulido, R. D. (2009). *Control estadístico de calidad y seis sigma, segunda edición*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Lean Institute Brasil. (2012). *Mapa de Flujo de Valor*. Fortaleza, Brasil.

Lean Roots. (mayo de 2013). *Lean Roots*. Obtenido de <http://www.leanroots.com/OEE.html>

Microsoft. Aplicación para windows 8. (Septiembre de 2014). *El tiempo de BING*.

Molteni Raúl, C. O. (2008). *El liderazgo de Lean Six Sigma*. Buenos Aires: Macchi.

Operación del Sistema Interconectado Nacional Colombiano. (abril de 2013). *Portal XM*. Obtenido de <https://sv01.xm.com.co/Opesin/paginas/index.asp>

Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia. (1998). *Manejo eficiente del carbón*. Bogotá: SENA.

Software MINITAB Versión 16. (Mayo de 2013). Herramienta de ayuda.

Universidad Alberto Hurtado. (mayo - octubre de 2013). Diplomado en metodología seis sigma nivel black belt. Santiago, Región Metropolitana, Chile.

11 Anexo N°1. Mapa

Mapa del Proceso Gestión del Combustible Carbón
en la Central “Ejemplo”

12 Anexo N°2.

Variables del proceso gestión del combustible carbón en central
“Ejemplo”

SIPOC

13 Anexo N°3.

Matriz FMEA

14 Anexo N°4.

Plan de acción de mejora para la etapa de implantación

15 Anexo N°5.

Plan de medición y control de variables críticas

16 Anexo N°6.

Conceptos básicos de estadística descriptiva y probabilidad

16.1 Conceptos básicos de estadística descriptiva y probabilidad.

Población.

Conjunto formado por la totalidad de individuos, objetos, elementos o medidas de interés sobre los que se realiza un estudio estadístico. Por ejemplo, una población son los productos que se producen mediante un proceso en una empresa durante una semana o un mes, e interesa saber si éstos reúnen las características de calidad requeridas. (Humberto Pulido, 2009)

Parámetro.

Es un valor calculado, representativo y descriptivo de una población, por tanto corresponde a cálculos efectuadas sobre la totalidad de los datos, como por ejemplo la media poblacional. (Humberto Pulido, 2009)

Tamaño de la población.

Es el número total de elementos que contiene la población (N), en nuestro caso es el número total de datos del proceso. Para el caso de un proceso, es posible considerar a la población como la totalidad de los datos obtenidos durante un periodo amplio de tiempo, como por ejemplo semanas, siempre y cuando éstos no sean pocos; de 120 a 150 datos en adelante es una cantidad razonable. También puede considerarse como población la totalidad de datos o mediciones que agrupan las distintas muestras que se han obtenido en un lapso de tiempo. (Humberto Pulido, 2009)

Muestra representativa.

Corresponde a un conjunto de datos que es subconjunto de una población, seleccionada de manera adecuada, que conserva las características de dicha población, por tanto puede representar el comportamiento de la misma. Una muestra se utiliza cuando no es posible obtener la totalidad de datos de la población y cuando si es posible obtener una porción adecuada de los datos mediante un experimento aleatorio, cuyas inferencias estadísticas realizadas por medio de un modelo, pueden ser atribuidas a la población. (Humberto Pulido, 2009)

Tamaño de la muestra.

Es el número total de elementos que contiene la muestra (n) correspondiente a un subconjunto de datos aleatorios de la población o del proceso. Es importante señalar que mientras más grande es el tamaño de la muestra, más se parecerá a la población, por tanto menor será la variación entre los cálculos efectuados sobre la población (Parámetros) y sobre la muestra (Estadísticos). (Humberto Pulido, 2009)

Experimento Aleatorio

Es aquel cuyo resultado no puede anticiparse aun cuando se repita bajo las mismas condiciones. (Humberto Pulido, 2009)

Inferencia Estadística.

Tiene como objetivo establecer las características de una población o proceso con base en la información contenida en una muestra. (Humberto Pulido, 2009)

Espacio Muestral.

Es el conjunto de resultados posibles de un experimento aleatorio. (Humberto Pulido, 2009)

Evento.

Es un subconjunto del espacio muestral de un experimento aleatorio. (Humberto Pulido, 2009)

Estadísticos.

Son mediciones o cálculos que se obtienen de un conjunto de datos con el objetivo de conocer sus características más relevantes. Se utiliza este término a los cálculos que se realizan sobre los datos de una muestra. (Humberto Pulido, 2009)

16.2 Medidas de tendencia central

La tendencia central es el valor en torno al cual los datos o mediciones de una variable tienden a concentrarse, así con las mediciones de la variable de salida de un proceso, se podrá conocer si este está o no centrado, es decir si la medida central de la variable de salida es igual o está muy próxima a un valor deseado.

Media.

Medida igual al promedio aritmético de un conjunto de datos, que se obtiene al sumarlos y el resultado se divide por el número de datos. (Humberto Pulido, 2009)

Un aspecto relevante a tomar en cuenta cuando se usa la media, es que ésta resulta afectada por datos extremos o atípicos, lo cual incurre a que este esté estimador es “Sesgado”, entendiendo que el sesgo de un estimador es la diferencia que hay entre el valor esperado del estadístico muestral y el parámetro de la población. (Humberto Pulido, 2009)

Para comprender lo anterior, se muestra el siguiente ejemplo:

La media de los siguientes datos: 1.100, 1.300, 1.000, 1.500, 800, 1.600 y 1.100 es 1.200, pero si a la lista anterior le agregamos un solo dato igual a 7.600, el resultado es 2.000, lo que inmediatamente nos arroja una alarma ya que existe un solo dato por encima de la media.

Mediana.

Se obtiene al encontrar el valor que divide a la mitad a los datos cuando estos son ordenados de menor a mayor. También es conocida como el percentil 50. (Humberto Pulido, 2009)

Cuando el tamaño de la muestra es impar, la mediana corresponde al número que se ubica justo en la mitad y cuando el número de la muestra es par, la mediana se calcula dividiendo entre dos la suma de los números que están en el centro del ordenamiento. (Humberto Pulido, 2009)

A diferencia de la media, la mediana no es afectada cuando la distribución de datos es sesgada, para comprender esto tomaremos los mismos datos del ejemplo que dimos para la media. (Humberto Pulido, 2009)

La mediana de los siguientes datos: 1.100, 1.300, 1.000, 1.500, 800, 1.600 y 1.100 es 1.100 y si a la lista anterior le agregamos un solo dato igual a 7.600, el resultado es 1.200. Por lo tanto bajo estas condiciones la mediana es mejor medida de tendencia central que la media y también se deriva que para describir la tendencia central de los datos, es imprescindible apoyarse tanto en la media como en la mediana y la moda. Cuando la media es muy diferente a la mediana es señal de que existen datos atípicos o existe un sesgo importante, por lo que será mejor reportar como medida de tendencia central la mediana e investigar a que se deben los datos atípicos, ya que puede reflejar un aspecto importante del proceso. (Humberto Pulido, 2009)

Moda.

Esta medida de tendencia central corresponde al dato de la muestra que se repite más veces. Si varios datos tienen la frecuencia más grande, cada uno de ellos es una moda, y se dice que el conjunto de datos es multimodal. (Humberto Pulido, 2009)

16.3 Medidas de dispersión o variabilidad

Las medidas de tendencia central mencionadas en el ítem anterior son insuficientes para como criterio de calidad ya que no toman en cuenta que tan dispersos están los datos y que porción o porcentaje de datos no cumple con las especificaciones. (Humberto Pulido, 2009)

Para aclarar lo anterior supongamos que la longitud de una pieza debe estar entre 800 ± 5 mm. Para ver si se cumple con las especificaciones se toma una muestra aleatoria grande y se obtiene que la media es 801mm, la mediana es 801mm y la moda es 800mm. Debido a que estos estadísticos están dentro de las especificaciones, se podría creer que el proceso cumple con éstas. Sin embargo, esto no necesariamente es cierto, ya que en la muestra podría haber datos desde 750mm hasta 850mm y la media de todos ellos ser 801, incumpliendo las especificaciones en una porción importante de los datos, y que tendríamos datos por debajo

del límite inferior de calidad o por encima del límite superior de calidad. Pero también podría ocurrir que el rango de variación de los datos vaya de 797 a 803, con lo que si se cumpliría con las especificaciones. Esto explica que las medidas de tendencia central son insuficientes como criterio de calidad, lo que justifica que en este ítem abordemos las medidas de variabilidad. (Humberto Pulido, 2009)

Las medidas de dispersión o variabilidad sirven para conocer qué tan diferentes son los datos de una muestra entre sí. (Humberto Pulido, 2009)

Desviación Estándar.

Esta medida indica que tan esparcidos están los datos respecto a la media. Se denota con la letra “S” cuando la medición se efectúa sobre los datos de una muestra o con la letra griega “ σ ” cuando se emplean todos los elementos de la población o proceso. La Desviación Estándar mide la distancia que en “promedio” hay entre los datos y la Media, reflejando lo retirado que están los datos de la Media y, al igual que ésta última, la Desviación Estándar es afectada por datos atípicos, pero es independiente a la magnitud de estos últimos. La Desviación Estándar es expresada en las mismas unidades de medición que los datos de la muestra y mientras más grande sea el valor calculado, habrá mayor variabilidad en los datos. (Humberto Pulido, 2009)

La Desviación Estándar se calcula con la siguiente expresión. (Humberto Pulido, 2009)

$$S = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{(n - 1)}}$$

Donde x_1, x_2, \dots, x_n son las observaciones numéricas de la muestra, n su tamaño y \bar{x} es la media muestral. (Humberto Pulido, 2009)

Varianza.

Se calcula como el cuadrado de la desviación estándar, se denota como S^2 para la varianza muestral o σ^2 cuando corresponde a la varianza poblacional. Esta medida de dispersión es muy utilizada para las inferencias estadísticas o hipótesis que se hacen sobre los datos que reflejan el comportamiento de una variable de salida de un proceso. (Humberto Pulido, 2009)

Rango o recorrido.

El Rango o Recorrido “R” es igual a la diferencia entre el dato mayor y el dato menor de un grupo de datos. El resultado es independiente de la magnitud de los datos, por ejemplo, para los conjuntos de datos $A = \{10,12,14\}$ y $B = \{156,161,163\}$, se observa que la magnitud de los datos es diferente, pero en cuanto a la variabilidad, los datos están dispersos de la misma manera, como lo indica la desviación estándar que es igual a 2 en ambos casos, el rango que es igual a 4 para los dos conjuntos. (Humberto Pulido, 2009)

Coefficiente de Variación.

El coeficiente de variación (CV), es una medida que es relativa a la magnitud de los datos, ya que igual a la magnitud relativa de la desviación estándar en comparación con la media de los datos, es decir:

$$CV = \frac{S}{\bar{x}}(100)$$

Esa medida es útil para comparar la variación de dos o más variable que están medidas en diferentes escalas o unidades de medición. Este coeficiente suele interpretarse como una medición en términos porcentuales de la variación de una variable. Por ejemplo para los conjuntos de datos $A = \{10,12,14\}$ y $B = \{156,161,163\}$, se tiene que sus correspondientes CV, son:

$$CV_A = \frac{2}{12} \times 100 = 16.66 \text{ y } CV_B = \frac{2}{161} \times 100 = 1.242$$

Respectivamente, por lo que la variabilidad en términos relativos del CV para el conjunto de datos A es 16.66%, mientras que para el conjunto B es sólo 1,242%.

Limites naturales o reales de un proceso.

Una manera de conocer el comportamiento de una población o proceso es nuevamente utilizando una relación entre la desviación estándar y la media de la muestra de datos seleccionados, para esto podemos usar la *regla de desigualdad de Chebyshev* y la *regla empírica*. La regla de desigualdad de Chebyshev es que al menos el 89% de los datos que explican el comportamiento de una variable de salida o proceso se encuentran entre la media más tres desviaciones estándar y entre la media menos tres desviaciones estándar de los datos recopilados ($\bar{X} \pm 3S$), en cuanto la regla empírica se afirma que muchos de los datos que surgen en la práctica se ha observado por la experiencia que:

Entre $\bar{X} - S$ y $\bar{X} + S$ está el 68% de los datos de una muestra.

Entre $\bar{X} - 2S$ y $\bar{X} + 2S$ está el 95% de los datos de una muestra.

Entre $\bar{X} - 3S$ y $\bar{X} + 3S$ está el 99.7% de los datos de una muestra.

Todos los intervalos anteriores son válidos sólo para los datos muestrales, por lo que en la medida que se tengan muestras aleatoria grandes y representativas, los intervalos anteriores podrán dar una idea aproximada a lo que pasa en el proceso.

Lo que afirma el teorema de Chebyshev se aplica para cualquier tipo de datos, independientemente de su comportamiento o distribución. Mientras que la regla empírica, como su nombre lo dice, se obtuvo por medio de la observación empírica, y es válida para muchos casos que se dan en la práctica sobre todo si los datos tienen un comportamiento o distribución con cierto grado de similitud a una campana o a la distribución normal, como el caso que muestra el ejemplo anterior en el histograma de notas de 32 alumnos de un curso.

Los límites reales o naturales de un proceso indican los puntos entre los cuales varía la salida de un proceso y, se obtienen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Limite Real Inferior (LRI)} &= \mu - 3\sigma \\ \text{Limite Real Superior (LRS)} &= \mu + 3\sigma \end{aligned}$$

Donde μ es la media del proceso o población y σ es la desviación estándar del proceso o población.

El cálculo de estos límites está inspirado en la regla empírica, que a su vez coincide con la propiedad de la distribución normal que veremos más adelante y que corresponde a la distribución que generalmente se utiliza para las inferencias estadísticas de los procesos ya que la distribución de los datos obtenidos en la práctica de diferentes procesos, generalmente resulta semejante a esta distribución.

Distribución de un conjunto de datos e Histograma.

Una herramienta fundamental para analizar gráficamente los datos recogidos en una muestra o población es mediante un histograma, al cual permite conocer y visualizar, la medida de tendencia central, la dispersión además de la forma en que los datos se distribuyen en su rango de variación. (Humberto Pulido, 2009)

El histograma es una representación gráfica, en forma de barras, de la distribución de un conjunto de datos o una variable, pudiendo obtener un conocimiento importante de la capacidad y comportamiento de un proceso, donde los datos se clasifican según su magnitud en cierto número de grupos o “Clases”, las cuales agrupan a los datos cuyas magnitudes se encuentran dentro del rango definido en cada clase y donde cada clase es representada por una barra, cuya longitud es proporcional a la frecuencia de los valores presentados o dicho de otra forma, la longitud de cada barra es proporcional a la cantidad o número de datos cuyas magnitudes caben dentro de cada clase. Por lo general, el eje horizontal está formado por una escala numérica para mostrar la magnitud de los datos en las unidades en las cuales se mide la variable observada; mientras en el eje vertical se representan las frecuencias. (Humberto Pulido, 2009)

Para elaborar un histograma es fundamental definir la cantidad de clases ya que esto permitirá entregar mayor o menor detalle gráfico de la distribución de los datos. Para esto último se recomienda que el número de clases sea de 5 a 15, pudiendo también utilizar el criterio conocido como regla e Sturges, la cual señala que el número adecuado de clases es igual $1 + 3.3 \times \log_{10}(\text{Número de datos})$ (Humberto Pulido, 2009)

Hoy en día los softwares nos ayudan con aplicaciones que no hacen necesario calcular previamente el número de clases y generar una tabla de frecuencia para conocer el tamaño de las clases, sino que estos generan automáticamente el histograma con el solo hecho de entregarle los datos tabulados, como en el caso de Excel o Minitab.

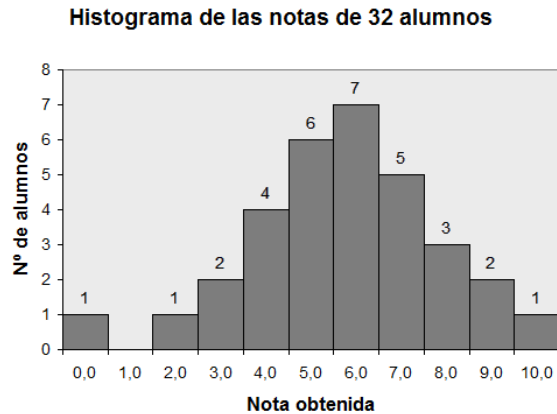


Figura N° 91. Ejemplo de Histograma.

En la figura anterior es posible observar gráficamente la distribución de la variable “Nota” de un curso de 32 alumnos, donde es posible apreciar visualmente la tendencia central y rango de variación, aunque con los datos también podemos obtener los estadísticos que ya hemos conocido hasta ahora. Sin embargo con los histogramas podemos visualizar y conocer otros aspectos importantes que se relatan a continuación. (Humberto Pulido, 2009)

Interpretación del Histogramas.

a) Límites de especificación de un proceso.

En estudios de capacidad de procesos, los límites naturales o reales se comparan con las especificaciones para las características de calidad. Por ejemplo, si las especificaciones para una característica de calidad son que ésta debe tener dimensiones de 800 ± 5 ; luego, el límite de especificación inferior es $LEI=795$, y el límite de especificación superior es $LES=805$. Si además se sabe que la media y la desviación estándar de tal característica de calidad o variable de salida del proceso son $\mu = 800.6$ y $\sigma = 1.2$, respectivamente, entonces los límites reales son:

$$LRI = 800.6 - 3(1.2) = 797.0 \text{ y } LRS = 800.6 + 3(1.2) = 804.2$$

Por lo tanto se espera que esta característica de calidad varíe de 797.0 a 804.2, con una media de 800.6. Al comprobar esto con las especificaciones se precia que los límites reales del proceso ceben dentro de los límites de especificación de calidad, entonces se concluye que el proceso es capaz de cumplir con tales especificaciones. (Humberto Pulido, 2009)

Algunos procesos solo tienen un límite de especificación ya sea inferior o superior, lo cual depende de la característica de calidad o variable de salida analizada, por ejemplo en el histograma mostrado en la figura N°88 con la distribución de Notas de un curso de 32 alumnos, tendríamos solo un límite inferior de calidad, que será la nota mínima de aprobación, por ejemplo 5,0 y no tendríamos límite de especificación de calidad superior ya que lo ideal es que obtengan la calificación más alta posible. Los límites de especificación suelen incluirse en los histogramas, lo que nos permite observar visualmente si el proceso es capaz y si el proceso

se encuentra o no centrado, como se muestra en el siguiente ejemplo. (Humberto Pulido, 2009)

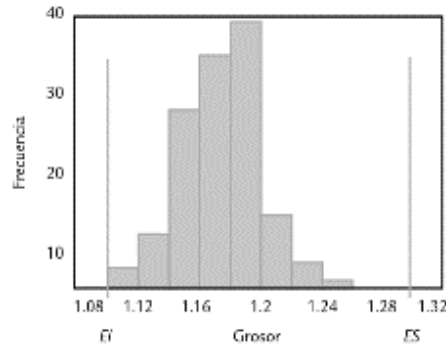


Figura N° 92. Ejemplo de Histograma con Límites de Especificación de Calidad. (Humberto Pulido, 2009)

b) Observar la tendencia central de los datos.

Localizar en el eje horizontal o escala de medición las barras con mayores frecuencias. Por ejemplo en el histograma del inciso anterior, el centro se localiza entre 1.14 y 1.20 mm. (Humberto Pulido, 2009)

c) Estudiar el centrado y variabilidad del proceso. (Humberto Pulido, 2009)

Estudio de Centrado del Proceso.

Para esto hay que apoyarse en el punto anterior y observar la posición central del cuerpo del histograma con respecto a los límites de especificación de calidad. (Humberto Pulido, 2009)

Estudio de Variabilidad del Proceso

Consiste en comparar la amplitud de las especificaciones de calidad con el ancho del histograma. Para considerar que la dispersión no es demasiada, el ancho del histograma debe caber de forma holgada dentro de los límites de especificación. (Humberto Pulido, 2009)

En el siguiente histograma de ejemplo se muestra un proceso centrado y capaz. (Humberto Pulido, 2009)

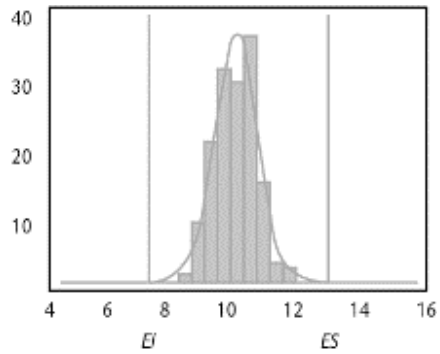


Figura N° 93. Ejemplo de Histograma de un Proceso Centrado y Capaz. (Humberto Pulido, 2009)

En el siguiente histograma de ejemplo se muestra un proceso centrado pero con alta variabilidad, cuyos límites reales superan los límites de especificación por tanto el proceso no es capaz. (Humberto Pulido, 2009)

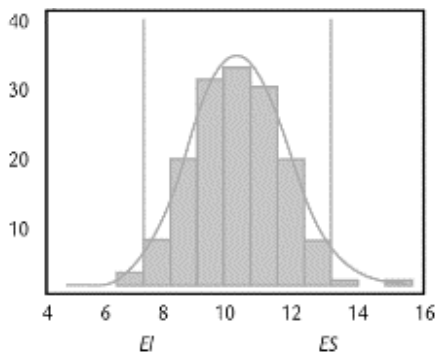


Figura N° 94. Ejemplo de Histograma de un Proceso Centrado con Alta Variabilidad. (Humberto Pulido, 2009)

En el siguiente histograma de ejemplo se muestra un proceso descentrado con poca variabilidad. Ese proceso no cumple el límite de especificación inferior por estar descentrado y no por tener un problema de alta variabilidad. (Humberto Pulido, 2009)

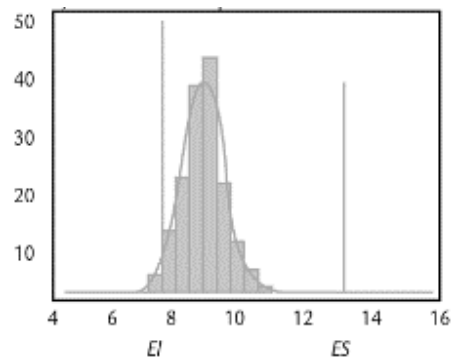


Figura N° 95. Ejemplo de Histograma de un Proceso Descentrado con Poca Variabilidad.
(Humberto Pulido, 2009)

En el siguiente histograma de ejemplo se muestra un proceso descentrado con alta variabilidad. Este proceso no cumple con los límites de especificación tanto por estar descentrado como por tener alta variabilidad. (Humberto Pulido, 2009)

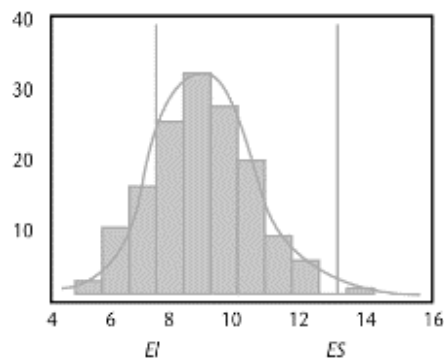


Figura N° 96. Ejemplo de Histograma de un Proceso Descentrado y con Alta Variabilidad.
(Humberto Pulido, 2009)

Un proceso al estar descentrado o con alta variabilidad tiene un potencial de mejora potencial, aunque cumpla con los límites de especificación, ya que la calidad que se produce no es la óptima. Por ello, en caso de tener un proceso descentrado o con alta variabilidad se procede a realizar los ajustes o cambios necesarios para centrarlo y llevarlo al óptimo. En la práctica lo anterior requiere un análisis de la situación actual (pérdidas asociadas) y potenciales riesgos, para luego buscar analizar las causas que afecta al descentramiento o variabilidad del proceso, para luego buscar alternativas de solución, pasar a un proceso de selección de la mejor alternativa mediante un análisis de Costos y Beneficios, y finalmente determinar el plan de acción e implantación del proyecto de mejora que se requiere realizar. Esto último rige para los siguientes incisos y cada vez que se requiere efectuar una mejora a un proceso. (Humberto Pulido, 2009)

d) Analizar la forma del histograma.

Al observar un histograma se debe considerar que la forma de distribución de campana es la que más suele darse en las salidas de procesos, la cual tienen características similares a la distribución normal que se verá más adelante. Es frecuente que cuando la distribución no es de este tipo sea la señal de un hecho importante que está ocurriendo en el proceso y que tiene un efecto negativo en la calidad. Por ello, es necesario analizar si la forma del histograma es muy diferente a la de campana. Algunas de las formas que podrían encontrarse para variables de salida de un proceso y que no coinciden con una distribución de campana, son las siguientes (Humberto Pulido, 2009):

Distribución Sesgada

Un sesgo en una variable de salida se puede observar en un histograma cuando aparecen valores a un solo lado de la distribución alargado la cola de la campana hacia el lado donde aparecen estos valores (Izquierdo o Derecho). En términos generales este refleja el desplazamiento paulatino de un proceso debido a diferentes causas, tales como desgaste, desajustes, crecimientos de la demanda en el caso de factores de utilización de capacidades nominales de máquinas; asimismo, puede indicar procedimientos viciados en la forma de obtener las mediciones o un desempeño especial del proceso. (Humberto Pulido, 2009)

El siguiente histograma muestra un ejemplo de distribución sesgada a la derecha. (Humberto Pulido, 2009)

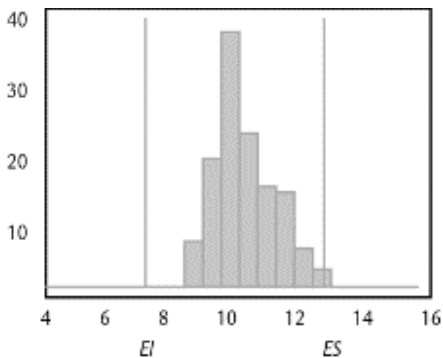


Figura N° 97. Ejemplo de Histograma de un Proceso con Distribución Sesgada a la Derecha. (Humberto Pulido, 2009)

Una forma de comprobar si una distribución sesgada indica una situación especial a corregir, consiste en comparar ésta con la distribución de la misma variable o característica para datos obtenidos en otro periodo de tiempo. La recomendación general es que ante la sospecha de que hay algo especial detrás de una distribución con sesgo se debe investigar si efectivamente es así. (Humberto Pulido, 2009)

Por otro lado una medida numérica del Sesgo o Asimetría en la distribución de un conjunto de datos, se obtiene a través del sesgo y del sesgo estandarizado (*skewness*), los cuales están dados por. (Humberto Pulido, 2009)

$$Sesgo = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)S^3}$$

$$Sesgo \text{ Estandarizado} = \frac{Sesgo}{\sqrt{\frac{6}{n}}}$$

Donde n es el tamaño de la muestra, S es la desviación estándar y \bar{X} la media muestral. (Humberto Pulido, 2009)

El signo del Sesgo indica el lado para el que la cola de la distribución es más larga, ya sea hacia la izquierda (Signo -) o hacia la derecha (signo +). Para los datos que siguen una distribución normal, el valor del sesgo estandarizado debe caer dentro de $(-2, +2)$, por lo que si n es grande ($n > 100$) y el sesgo estandarizado está fuera de tal intervalo, será una evidencia de que la distribución de los datos tiene un sesgo significativamente diferente al de la distribución normal o, en otras palabras, que la distribución de los datos no es normal. (Humberto Pulido, 2009)

Distribución multimodal

Se observan en los histogramas cuando se observa claramente dos tendencias centrales diferentes por ejemplo, dos modas o dos picos. Generalmente este tipo de distribuciones reflejan la mezclas de datos de dos poblaciones diferentes, dos o más realidades o condiciones diferentes. (Humberto Pulido, 2009)

En general una distribución multimodal se debe a la presencia de fuentes de variación bien definidas que deben ser determinadas utilizando por ejemplo análisis de causa raíz, con el fin de corregir las desviaciones y mejorar el proceso. (Humberto Pulido, 2009)

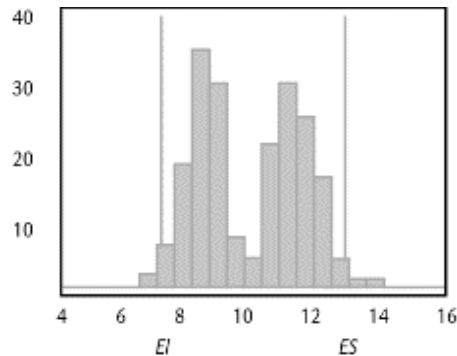


Figura N° 98. Ejemplo de Histograma de un Proceso con Distribución Multimodal. (Humberto Pulido, 2009)

Un ejemplo de mezcla de datos de poblaciones diferentes que trae como consecuencia un histograma multimodal de dos picos es la distribución de estatura de personas adultas de un país, aquí el error está en mezclar los datos de mujeres y hombres. El primer pico de izquierda a derecha en la distribución, correspondería a la media de la distribución de la estatura de mujeres adultas de un país, mientras que el segundo pico correspondería a la media de la estatura de los hombres adultos del mismo país. (Los hombres tienden a ser más altos que las mujeres). (Humberto Pulido, 2009)

Distribución plana

Cuando la distribución es muy chata o plana y que está lejos de parecerse a una campana, pueden tener su origen en las mismas fuentes que comentamos en la distribución multimodal. (Humberto Pulido, 2009)

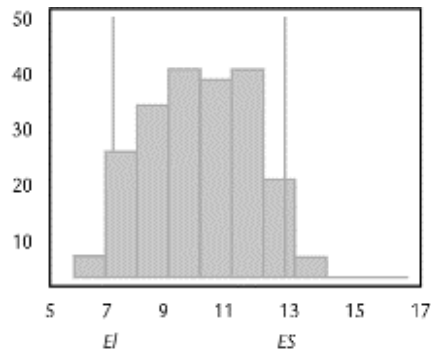


Figura N° 99. Ejemplo de Histograma de un Proceso con Distribución Plana. (Humberto Pulido, 2009)

Una medida para determinar qué tan elevada o plana (achatada o picuda) es la distribución de ciertos datos, tomando como referencia la distribución normal, se obtiene a través del estadístico llamado *Curtosis* y del *Coficiente de Curtosis Estandarizado*, que están dados por (Humberto Pulido, 2009):

$$Curtosis = \frac{n(n+1) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)S^4} - \frac{3(n-1)}{(n-2)(n-3)}$$

$$Curtosis Estandarizado = \frac{Curtosis}{\sqrt{\frac{24}{n}}}$$

Donde n es el tamaño de la muestra, S es la desviación estándar y \bar{X} la media muestral.

Distribución con acantilados

Se observa en el histograma como un corte brusco en la caída de la distribución en uno o ambos lados de la campana (izquierdo y derecho). Algunas posibles causas que motivan la presencia de un acantilado son: insuficientes clases para el histograma, por ejemplo cuando la primera (Izquierda) o última clase del histograma (derecha) concentra un conjunto elevado de datos cuando en alguna de esta clase se decide poner “Menores que” o “Mayores que” (Ej. Maquinas mayores a 30 años), otra causa puede ser un equipo de medición con sensibilidad inadecuada, errores en la medición o inspección como por ejemplo cuando un inspector de calidad está predispuesto a aceptar artículos, entonces cuando observa que algunos de estos casi cumplían con la especificación, los registra con la medida mínima aceptable. (Humberto Pulido, 2009)

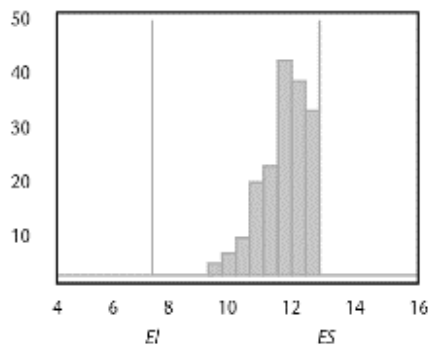


Figura N° 100. Ejemplo de Histograma de un Proceso con Distribución con Acantilados. (Humberto Pulido, 2009)

e) Datos raros o atípicos.

En el histograma es posible que aparezcan barras pequeñas bastante separadas o aisladas del resto. Estos corresponden a datos raros o atípicos, los cuales reflejan una situación especial que se debe investigar, y entre las posibles están las siguientes: (Humberto Pulido, 2009)

- Datos incorrectos por error de digitación.
- Datos correspondientes a otra población.
- Ocurrencia de una situación especial en el proceso en el momento que se tomó la medición.

f) Estratificación.

Para encontrar las fuentes de variación que originan distribuciones distintas a la Distribución Normal o para estudiar los procesos con alta variabilidad y en consecuencia incapaces de cumplir las especificaciones de calidad, se recomienda efectuar la estratificación de los datos, siempre que sea posible separar los datos cuando estos provienen de distintas máquinas, distintos proveedores, distintos turnos, distintos operadores, distintas temporadas (verano o invierno), distintos sexos, distintas edades, distintos locales o puntos de venta, etc. Efectuando luego los análisis de histogramas de cada fuente por separado (Estratificación),

con el propósito de determinar cuál o cuáles son las fuentes que más contribuyen a los problemas de variabilidad, pudiendo complementar lo anterior con un análisis de Gráficas de Pareto de fuentes de variación y su efecto en la variabilidad del proceso. (Humberto Pulido, 2009)

Limitaciones de los histogramas.

Aunque el histograma es una herramienta fundamental para analizar el desempeño de un proceso, tiene algunas limitaciones, las cuales se mencionan a continuación (Humberto Pulido, 2009):

- a) No considera el periodo de tiempo en el que se obtuvieron los datos; por lo tanto, con el histograma es difícil detectar tendencias que ocurren a través del tiempo, a menos que se haga una estratificación de los periodos de tiempo como grupos separados de observación. Sin embargo la mejor herramienta para estudiar la estabilidad del proceso y tendencias en el tiempo son las cartas o gráficas de control, entre las que se encuentran las gráficas de línea, que se verán más adelante.
- b) No es la técnica más apropiada para comparar de manera práctica varios procesos o grupos de datos; en esos casos el Diagrama de Caja es una herramienta estadística más apropiada.
- c) La cantidad de clases o barras influye en un histograma, por lo que una buena práctica es que a partir de la cantidad de clases que de manera inicial sugiere un software, se analice el histograma con un número de clases menor y luego un número de clase mayor, a fin de verificar si se observa algo diferente.

Cuantiles o Percentiles

Los cuantiles son medidas de localización que dividen un conjunto de datos ordenados en cierto número de grupos o partes que contienen la misma cantidad de datos. Por ejemplo, si los datos ordenados se dividen en tres partes, entonces a los correspondientes cuantiles se les conoce como terciles, pero si se dividen en cuatro grupos tendremos los cuartiles, en cinco serán quintiles, si la división es en 10 partes tendremos los deciles y, por último si la división es en 100 grupos se tendrán los percentiles.

De manera más formal, sea x_1, x_2, \dots, x_n un conjunto de n mediciones ordenadas de forma creciente, se define su *percentil* p como el valor x tal que el p % de las mediciones es menor o igual a x y el $(100-p)$ % mayor o igual. (Humberto Pulido, 2009)

Cuartiles.

Los cuartiles corresponden a los percentiles 25, 50 y 75. El percentil 25 es conocido como primer cuartil o *cuartil inferior*, C_i ; mientras que la mediana que es el percentil 50 corresponde al *cuartil medio* C_m y el percentil 75 es el *cuartil superior* C_s o tercer cuartil. (Humberto Pulido, 2009)

Diagrama de Caja

Es una representación gráfica de la distribución de un conjunto de datos que se basa en los cuartiles. Es de gran utilidad para hacer análisis comparativos, tales como comparación de procesos, tratamientos y, en general, para hacer análisis por estratos (lotes, proveedores, turnos, sucursales, empresas, etc.). Muestra en forma de gráfica un resumen de la distribución de una muestra que exhibe su forma, tendencia central y variabilidad, como se basa en los cuartiles divide los datos ordenados en cuatro grupos, que contienen, cada uno el 25% de las mediciones. De esta manera es posible visualizar dónde termina de acumularse el 25% de los datos menores, y a partir de dónde se localiza el 25% de los datos mayores. Entre estos dos cuartiles se ubica el 50% de los datos que están en el centro. Pero además de los cuartiles están involucrados los siguientes conceptos (Humberto Pulido, 2009):

Rango intercuartilico o altura de la caja, $R_c = C_s - C_i$, correspondiente al 50% de los datos que están en el centro de la distribución.

Barrera Interior Inferior, $C_i - 1.5R_c$

Barrera Interior Superior, $C_s + 1.5R_c$

Barrera Exterior Inferior, $C_i - 3R_c$

Barrera Exterior Superior, $C_s + 3R_c$

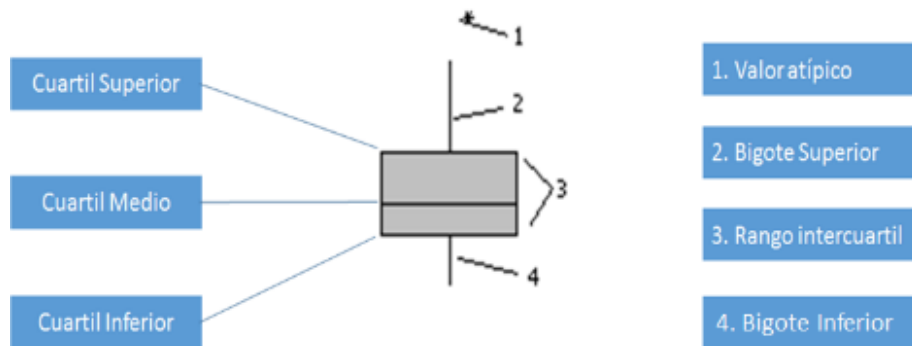


Figura N° 101. Representación de un Diagrama de Caja (Software MINITAB Versión 16, 2013)

El tamaño del diagrama de caja es proporcional al rango de variación de la distribución de los datos. El alto de la caja va desde el cuartil inferior hasta el cuartil superior, así el largo de la caja es igual al rango intercuartilico. Justo al centro de la caja se ubica el cuartil medio o la mediana. (Humberto Pulido, 2009)

En la parte inferior de la caja, se traza una línea vertical cuyo largo va desde el cuartil inferior, hasta el dato de la distribución más pequeño que aun este dentro de la barrera interior

inferior. A esta línea o trazo se le conoce como Bigote Inferior. Si existen datos por debajo de la barrera inferior interior, se representan por medio de puntos aislados que se ubicarán de acuerdo a la magnitud del dato correspondiente. (Humberto Pulido, 2009)

En la parte superior de la caja se traza una línea vertical, cuyo largo va desde el cuartil superior hasta el dato más grande que aún está dentro de la barrera interior superior. A esta línea o trazo se le conoce como Bigote Superior. Si existen datos por arriba de la barrera superior interior, se representan por medio de puntos aislados que se ubicarán de acuerdo a la magnitud del dato correspondiente. (Humberto Pulido, 2009)

Los datos que superan las barreras interiores pueden ser considerados como datos alejados con cierta sospecha de ser atípicos. (Humberto Pulido, 2009)

Si aún hay datos que estén por fuera de las barreras exteriores, se representarán por un asterisco y definitivamente pueden considerarse como Datos Atípicos, muy alejados, raros o aberrantes. (Humberto Pulido, 2009)

El diagrama de caja por sí solo no porta más información que un histograma, sin embargo cuando existen estratificaciones de datos, donde se puedan crear más de una caja, se pueden obtener comparaciones muy útiles, como por ejemplo (Humberto Pulido, 2009):

Un ingeniero especialista en calidad compara el diámetro de tubos de plástico producidos semanalmente en el transcurso de tres semanas. Las gráficas de caja de abajo representan los resultados de cada semana. (Humberto Pulido, 2009)

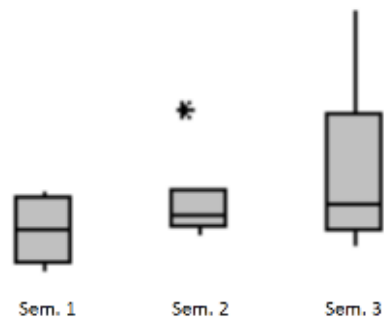


Figura N° 102. Ejemplo aplicado de diagramas de cajas (Software MINITAB Versión 16, 2013)

Las medianas de las tres semanas son similares. Sin embargo, las gráficas de caja muestran una diferencia en la variabilidad, con una tendencia a que se produzcan tubos de mayor diámetro en el transcurso del tiempo. Este análisis sería el primer paso para indagar qué es lo que está ocurriendo en el proceso, por ejemplo el aumento en la variabilidad podría deberse a que las máquinas de fabricación son calibradas a principios de mes según el procedimiento establecido, pero la evidencia muestra que las máquinas se desajustan al

transcurrir las semanas, por tanto una posible solución podría ser aumentar la frecuencia de ajuste de las máquinas. Por otro lado, si el ingeniero hubiera utilizado un indicador de seguimiento que midiese solo la tendencia central del diámetro de los tubos de plástico fabricados, no se habría percatado del problema ya que aquí estamos en presencia de un proceso centrado pero con alta variabilidad. (Humberto Pulido, 2009)

16.4 Conceptos básicos de Probabilidad y su relación con los estadísticos.

Los estadísticos que vimos en los párrafos anteriores, corresponden a medidas o funciones que se realizan sobre los datos muestrales, los cuales ayudan a caracterizar la distribución de los mismos, como por ejemplo la Media \bar{X} , la cual sirve para conocer la posición de la tendencia central de los datos de una muestra y puede ser utilizada de una forma apropiada para realizar inferencias (afirmaciones), sobre la media poblacional μ y por tanto sobre la población. (Humberto Pulido, 2009)

El aspecto clave en la interpretación y uso de cualquier estadístico calculado sobre una muestra obtenida a partir de un experimento aleatorio, es que este se define en términos probabilísticos como una **variable aleatoria X** , es decir que corresponde a una función que asocia un número con cada resultado del experimento aleatorio y que en nuestro caso generalmente serán variables aleatorias continuas, es decir que su resultado posible se encuentra dentro de un rango de números reales, en otro caso corresponderá a variables discretas cuyos valores resultantes se pueden numerar. La distribución de la variable aleatoria continua corresponde a la descripción del conjunto de valores posibles para X de la cual es posible obtener la distribución de probabilidad de X , correspondiente a la probabilidad asociada a cada uno de estos valores. (Humberto Pulido, 2009)

De lo anterior podemos decir que una población se caracteriza por una variable aleatoria y ésta, a su vez, por su distribución de probabilidad. Por lo general una distribución depende de parámetros que, si se desconocen como en la mayoría de los casos, será necesario estimarlos con base en los datos muestrales. Por ejemplo, una distribución normal tiene como parámetros a la media μ , y la desviación estándar σ , que generalmente no se conocen y que se pueden estimar mediante los estadísticos de la media \bar{X} desviación estándar S de una u varias muestras. (Humberto Pulido, 2009)

El aspecto relevante a comprender de lo anteriormente expuesto es que un parámetro se puede estimar en términos estadístico a partir de un estadístico. La estimación puede ser puntual o en un intervalo. En el primer caso la estimación del parámetro se asume igual al valor puntual obtenido por el estadístico para los datos de una muestra, entonces es menos precisa debido a que el valor del estadístico es aleatorio y depende de los elementos que fueron tomados de la muestra, por lo que el valor del parámetro variará de una muestra a otra. Así, la estimación puntual dirá poco sobre el parámetro cuando la variación entre una estimación y otra es muy grande. Una forma de saber qué tan variable es el estimador consiste en calcular la desviación estándar o el **error estándar** del estadístico, visto como una variable aleatoria. (Humberto Pulido, 2009)

La forma operativa de saber qué tan precisa es la estimación del parámetro poblacional a partir de un estadístico, consiste en calcular un **intervalo de confianza** que indique un rango donde puede estar el parámetro, con cierto nivel de seguridad o confianza, para lo cual la bibliografía (Humberto Pulido, 2009, p. 69) dispone de una serie de fórmulas para obtener los distintos parámetros mayormente utilizados, como la media y la varianza, las cuales se encuentran integradas en los software estadístico que se utiliza en esta tesis, correspondiente a Minitab 16. Así mismo el software que utilizaremos incluye en los cálculos el “**P-value**” el cual indica si el resultado obtenido por un estadístico está dentro de un intervalo de aceptación ($P\text{-value} > 0,05$ para un intervalo de confianza del 95%), lo que se explicará con mayor detalle en el apartado de Prueba de Hipótesis. (Humberto Pulido, 2009)

16.4.1 Teorema del límite central.

Sea x_1, x_2, \dots, x_n una muestra aleatoria de cualquier población, y sea \bar{X} la media muestral; entonces, independiente de como sea la distribución de la población de donde se extrajo la muestra, la distribución de \bar{X} se aproxima a la **Distribución Normal** conforme n crece. (Humberto Pulido, 2009)

16.4.2 Distribución normal.

Es una distribución continua cuya densidad tiene forma de campana. Si X es una variable aleatoria normal, entonces su función de densidad de probabilidades está dada por (Humberto Pulido, 2009):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \text{ con } -\infty < x < \infty$$

Donde μ es su media y σ su desviación estándar. Al graficar $f(x)$ se obtiene una gráfica simétrica y unimodal. El centro coincide con μ , y la amplitud está determinada por σ . (Humberto Pulido, 2009)

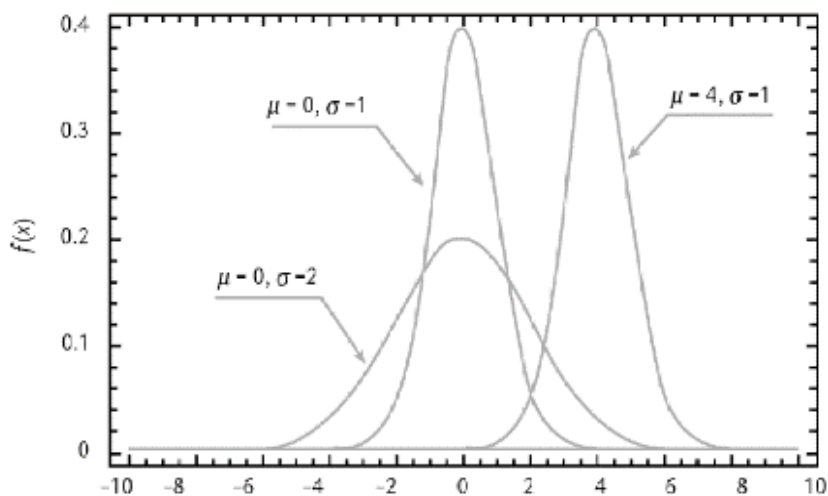


Figura N° 103. Ejemplo de funciones de densidad de probabilidades normal. (Humberto Pulido, 2009)

Nótese que la media proporciona localización y la desviación estándar la dispersión.

Propiedades de la distribución normal.

Si X es una variable aleatoria con distribución normal con media μ y varianza σ^2 , $N(\mu, \sigma^2)$, entonces cumple que (Humberto Pulido, 2009):

1. $P(\mu - \sigma < X < \mu + \sigma) = 0.6827$
2. $P(\mu - 2\sigma < X < \mu + 2\sigma) = 0.9545$
3. $P(\mu - 3\sigma < X < \mu + 3\sigma) = 0.9973$
4. $P(X = a) = 0$, para cualquier número a .

Estas propiedades señalan la proporción de la distribución normal que se localiza en torno a la media μ . Por ejemplo, entre más y menos una desviación estándar respecto a la media, se ubica el 68,27% del área, y en la media más menos tres veces la desviación estándar se encuentra el 99,73% de la distribución. Esta última es la razón de cómo se obtienen los límites reales de un proceso. (Humberto Pulido, 2009)

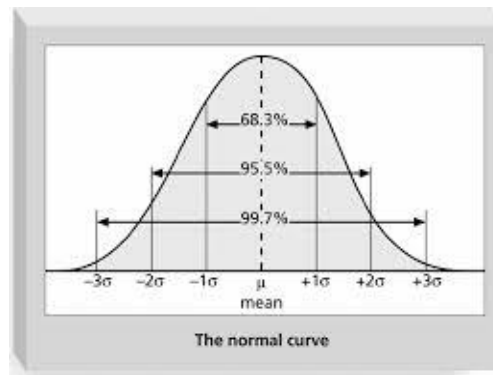


Figura N° 104. Distribución Normal (Humberto Pulido, 2009)

16.5 Pruebas de Hipótesis.

Muchos problemas requieren que se tome una decisión entre aceptar o rechazar una proposición sobre algún parámetro. Ésta proposición recibe el nombre de hipótesis. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

“Una hipótesis estadística es una aseveración sobre los parámetros de una o más poblaciones”. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Para probar una hipótesis estadística, tomamos una muestra aleatoria de la población en estudio y utilizamos los datos de la muestra para proporcionar evidencia que apoye o no la hipótesis. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Hipótesis Nula.

El término Hipótesis Nula se refiere a cualquier hipótesis que deseamos probar y se denota con H_0 . (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

La aceptación de una hipótesis nula, simplemente implica que los datos no dan suficiente evidencia para rechazarla, por lo que es recomendable que el planteamiento de la hipótesis nula sea siempre la NO significancia de las causas sobre el efecto, para así obligar a encontrar evidencia suficiente para rechazar esta hipótesis. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Hipótesis Alternativa.

El rechazo de la hipótesis nula conduce a la aceptación de una Hipótesis Alternativa, que se denota con H_a . (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Debe hacerse hincapié en que la verdad o falsedad de una hipótesis en particular nunca puede conocerse con certidumbre, a menos que pueda examinarse a toda la población. Usualmente esto es imposible en muchas situaciones prácticas. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Valor – P (P-Value).

Como en nuestro trabajo de tesis utilizaremos el software estadístico Minitab, es necesario indicar que al hacer algunos test estadísticos, este software ofrece como resultado el “p-value”. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Para cualquier tipo de distribución (Z, F, χ^2 etc.) y cualquier planteo de hipótesis, el P-value indica si estamos en la zona de aceptación o rechazo de la hipótesis nula. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Para explicar lo anterior, cuando se analizan diferencias entre una población y un target (valor histórico o referencial), trabajamos con una distribución de 2 colas que se ve de la siguiente manera (Universidad Alberto Hurtado, 2013):



Figura N° 105. Criterios de validación de hipótesis utilizando el Valor-P (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

En la etapa de análisis de un proyecto de mejora es necesario probar estadísticamente la significancia o no del efecto de las causas “x’s” sobre una variable de respuesta o salida “Y”, para esto es necesario conocer las distintas herramientas estadísticas que permitan analizar hipótesis utilizando datos del proceso. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Para la prueba de hipótesis a realizar, la aplicación de un tipo de test u otro depende de (Universidad Alberto Hurtado, 2013):

- 1- El tipo de variable que se esté analizando (Variable continua o atributo).
- 2- La normalidad de los datos.
- 3- La cantidad de poblaciones que se estén analizando.

Dependiendo del tipo de variables a analizar, el siguiente cuadro muestra los diferentes test de hipótesis que se pueden aplicar. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

		X (Factor) tratada como:	
		VARIABLE	ATRIBUTO
Y (Respuesta)	VARIABLE	<ul style="list-style-type: none"> •Diagrama de Dispersión •Correlación •Regresión Simple •Ajuste de Curva 	<ul style="list-style-type: none"> •Comparación de Medias(Grupos) •ANOVA •Prueba t •Homogeneidad de Varianza •Chi cuadrado χ^2
	ATRIBUTO	<ul style="list-style-type: none"> •Regresión Logística 	<ul style="list-style-type: none"> •Tablas de Contingencia •Chi Square:prueba dependencia

Figura N° 106. Test de hipótesis que se pueden aplicar según los tipos de variables de entrada y salida. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Es necesario comprobar la normalidad de los datos ya que existen test paramétricos, cuyo análisis se basa en la variación de Medias, y test no paramétricos cuyo análisis se basa en la variación de Medianas. Los primeros se utilizan cuando los datos se comportan con una distribución normal, mientras que los segundos se utilizan tanto para datos normales como no normales, sin embargo son menos precisos. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

En los test paramétricos se aplican los siguientes supuestos (Universidad Alberto Hurtado, 2013):

- a) Los datos corresponden a una variable
- b) La variable sigue una distribución normal
- c) Las varianzas de los subgrupos son similares u homogéneas
- d) Los datos son independientes

En los test No paramétricos para datos No Normales, no es necesario que se cumplan los puntos b) y c). (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Una vez que hemos recolectado los datos tanto de las causas “x’s” como de la variable de salida en la que hemos enfocado nuestro proyecto de mejora, debemos seguir los siguientes pasos para plantear y analizar las hipótesis que necesitamos demostrar o descartar y así posteriormente validar o desechar los factores realmente significativos del proceso. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

- I. Plantear Hipótesis
 - Ho: No existe diferencia significativa entre y
 - Ha: Existe diferencia significativa entre y
- II. Verificar Normalidad de los datos.
 - Se puede usar la aplicación de Minitab: Estadística/Estadística básica/Prueba de normalidad

- III. Verificar Homogeneidad de Varianzas.
Siempre y cuando existan al menos 2 muestras y que los datos sean normales. Se puede usar la aplicación de Minitab: ANOVA/Prueba de varianzas iguales.
- IV. Definir el Test a Utilizar en función de:
- Cantidad de Poblaciones.
 - Datos Continuos o Discretos.
 - Normalidad de los Datos.
- V. Realizar Test de Hipótesis.
Si la estadística calculada es mayor a la estadística crítica, entonces RECHAZAMOS Ho. Lo mismo ocurre usando Minitab si el Valor-P < 0.05 (P-Value < Alpha).
- VI. Traducir la conclusión estadística a términos de proceso.
- A continuación se describen los test de hipótesis que utilizaremos en el desarrollo del documento.

16.6 Prueba “t” para una muestra.

Este Test, trabaja con la distribución “t”. La estadística puede ser utilizada para probar si la media de la población es significativamente diferente del objetivo o el valor nominal. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

En otras palabras:

“¿Existe una diferencia significativa entre μ población y μ objetivo?”

Si existe, la x (causa) afecta significativamente a la Y (efecto). (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

La fórmula para la “Prueba t de 1 Muestra” es (Universidad Alberto Hurtado, 2013):

$$t_{n-1} = \frac{\bar{X} - \mu}{s / \sqrt{n}}$$

Donde:

- n = tamaño de la muestra
s = desviación estándar de la muestra
 μ = media del objetivo

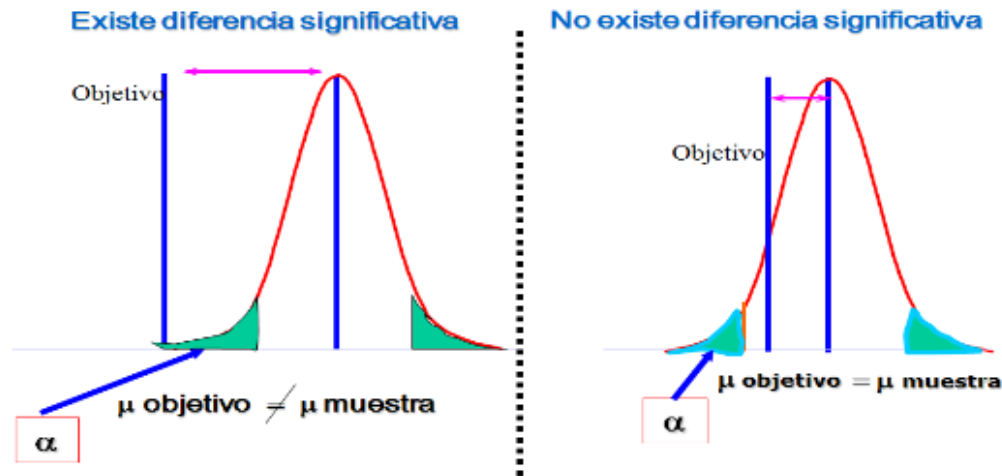


Figura N° 107. Visualización gráfica de la hipótesis para la prueba “t” de una muestra. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

16.7 ANOVA.

Técnica estadística para el análisis de varianzas, cuyo nombre ANOVA proviene del acrónimo ANalysis Of VARIance y que tiene como objetivo básico la comparación de las medias de más de dos poblaciones, por lo que comúnmente es utilizado para analizar el grado de incidencia de múltiples factores sobre la variación de una variable de salida dependiente. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Se utiliza para la verificar el grado de relación que existe en (Universidad Alberto Hurtado, 2013):

- La salida de un proceso como consecuencia de la variación de cada una de las variables “Independientes”.
- La salida como consecuencia de la variación que puede generar la interacción de variables dependientes entre sí.

Prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de factores. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de factores) son iguales mientras que la hipótesis alterna establece que al menos una es diferente. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

El nombre "análisis de la varianza" se basa en la manera en la cual el procedimiento utiliza las varianzas para determinar si las medias son diferentes. El procedimiento funciona comparando la varianza entre las medias de los grupos y la varianza dentro de los grupos como un método para determinar si los grupos son todos parte de una población más grande o poblaciones separadas con características diferentes, por tanto realiza el análisis de varias

fuentes de variación a través del Teorema del Límite Central. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Variación Total= Variación dentro (error) + Variación entre (factor)

Para ejecutar un ANOVA, debe tener una variable de respuesta continua y al menos un factor categórico con dos o más niveles. Los ANOVA requieren datos de poblaciones normalmente distribuidas con varianzas aproximadamente iguales entre los niveles de factores. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Utilizando el software MINITAB, al ejecutar el análisis de ANOVA es posible probar la igualdad de las varianzas y generar diversas gráficas, tales como gráficas de intervalos, gráficas de interacciones y grafica de efectos principales (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Como resultado del Análisis ANOVA, el software genera una tabla de salida principal de un estudio de análisis de varianza, el cual contiene los orígenes de variación, sus grados de libertad, la suma total de los cuadrados y la media de cuadrados. La tabla de análisis de varianza también incluye los resultados del contraste de hipótesis usando la distribución de Fisher, para lo cual arroja las estadísticas F y los valores p, los cuales se utilizan para determinar si los predictores o factores se relacionan significativamente con la respuesta. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Las tablas de ANOVA también se utilizan en los análisis de regresión y DOE.

Los siguientes son los términos utilizados que se deben conocer antes de ejecutar el test (Software MINITAB Versión 16, 2013):

- **Factor:** Variable de Entrada bajo estudio (Variación Entre)
- **Error:** “Ruido” Variación Aleatoria que no puede ser atribuida a uno o más factores (Variación dentro).
- **Respuesta:** Variable de Salida medida.

Los siguientes son los componentes de una tabla de ANOVA:

- **Origen** - indica el origen de la variación, bien sea del factor, de la interacción o del error. El total es la suma de todos los orígenes.
- **GL** - grados de libertad de cada origen. Si un factor posee tres niveles, los grados de libertad corresponden a 2 (n-1). Si tiene un total de 30 observaciones, el total de grados de libertad es 29 (n - 1).
- **SC** - suma de los cuadrados entre los grupos (factor) y la suma de los cuadrados dentro de los grupos (error).
- **MC**- la media de cuadrados se obtiene dividiendo la suma de los cuadrados entre los grados de libertad.

- **F** - Se calcula dividiendo el factor MS entre el factor MS dentro; se puede comparar esta relación con una F crítica encontrada en una tabla o se puede utilizar el valor p para determinar si un factor es significativo.
- **P** – Se utiliza para determinar si un factor es significativo; por lo general, se compara con un valor alfa de 0.05. Si el valor p es menor que 0.05, el factor es significativo.

ANOVA Compara el “factor” con el “error” y permite decidir en algún nivel de confianza. Si el MC (Factor) es pequeño, el factor no puede ser probado como responsable de las diferencias percibidas, por el contrario si es grande, el factor está jugando un rol significativo en las diferencias percibida. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

$$F = \frac{MC(Entre)}{MC(Dentro)}$$

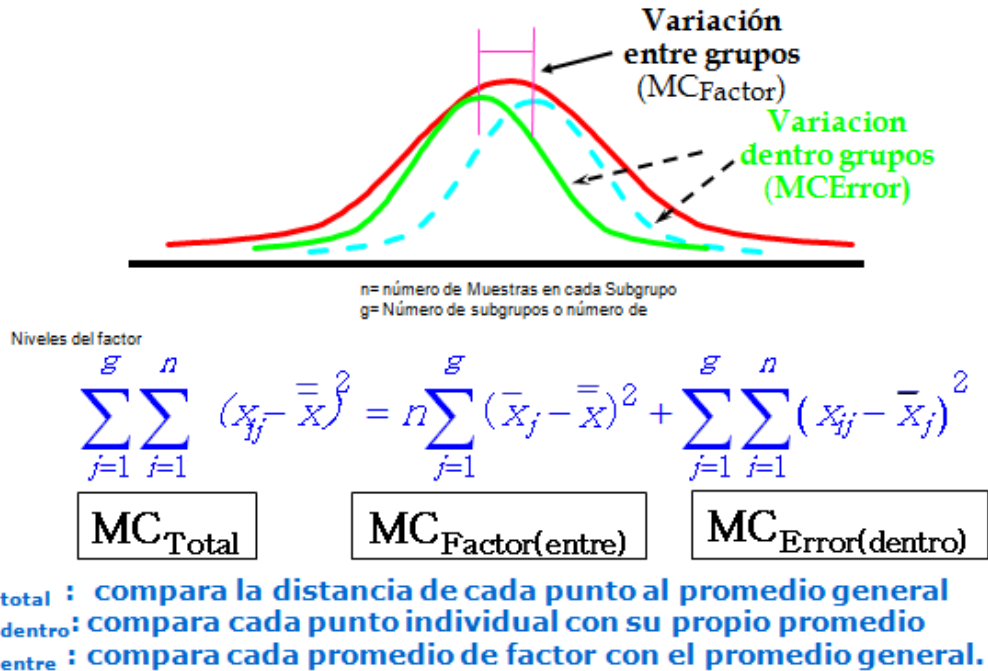


Figura N° 108. Visualización de variación dentro y entre grupos para el cálculo del F. (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

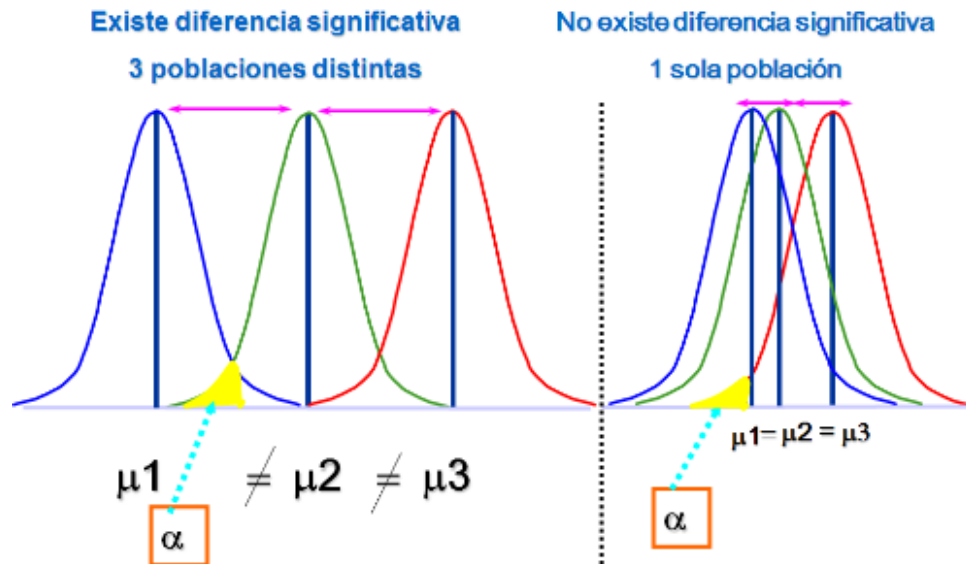


Figura N° 109. Visualización gráfica las hipótesis para ANOVA (Universidad Alberto Hurtado, 2013)

Ejemplo: Tabla de ANOVA de un solo factor

A modo de ejemplo, supongamos que ejecutamos un ANOVA para determinar cuál es el volante que más ventas genera entre tres volantes de color. Se configura el ANOVA de modo que su factor es "color del volante" el cual tiene tres niveles de "blanco y negro", "rojo" y "amarillo." Su variable de respuesta son las ventas semanales durante el período de prueba, de 10 semanas. Debido a que está examinando un solo factor, se utiliza un ANOVA de un solo factor, siguiendo el siguiente direccionamiento en el software MINITAB.

Estadísticas/ANOVA/Un solo factor

El resultado que arroja el software es el siguiente: (Software MINITAB Versión 16, 2013)

Origen	GL	SC	MC	F	P
Factor	2	20877338	10438669	136.82	0.000
Error	27	2060002	76296		
Total	29	22937340			

El valor p de 0.000 indica que el factor de color es significativo en las ventas

Regresión lineal simple.

El análisis de regresión lineal es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables. Para el caso de estudiar la relación en entre dos variables se denomina regresión lineal simple y para el caso de más de dos variables se denomina regresión lineal simple. (Dávila, 2004)

El análisis de regresión lineal puede utilizarse para explorar y cuantificar la relación entre una variable llamada dependiente o criterio (Y) y una o más variables llamadas independientes o predictores (X_1, X_2, \dots, X_k), así como para desarrollar una ecuación lineal con fines predictivos. (Dávila, 2004)

Al tabular los datos que se obtienen de la variable dependiente para distintos valores de la variable independiente es posible graficarlos en un diagrama de dispersión que muestra los puntos que se forman al unir los pares ordenados (X, Y) en el eje cartesiano formado para ambas variables. Al visualizar los puntos formados en el diagrama de dispersión es posible obtener una impresión rápida sobre el tipo de relación existente entre dos variables, la cual no siempre es perfecta o nula; de hecho, habitualmente no es ni lo uno ni lo otro, por tanto el desafío y el propósito de la regresión lineal es cuantificar ese grado de relación. (Dávila, 2004)

Cuando la nube de puntos que se forma en el diagrama de dispersión se muestra semejante a una recta o donde una recta podría atravesar la mayor cantidad de puntos existentes en el gráfico entonces es posible encontrar la recta que mejor se ajusta cuando esta hace mínima la suma de los cuadrados de las distancias o residuos verticales entre cada punto y la recta conocido como el método de los **Mínimos Cuadrados**. Los residuos se elevan al cuadrado porque, de lo contrario, al ser unos positivos y otros negativos, se anularían unos con otros al sumarlas. (Dávila, 2004)

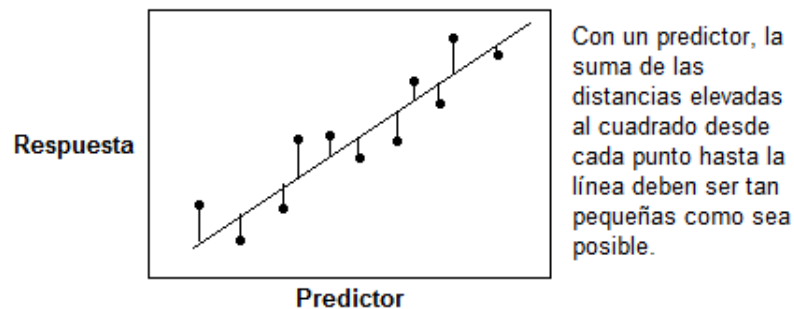


Figura N° 110. Ejemplo grafico de regresión lineal utilizando criterio de los mínimos cuadrados (Software MINITAB Versión 16, 2013)

La recta que cumple con el criterio de los mínimos cuadrados estará dada por (Dávila, 2004):

$$Y_i = B_0 + B_i X_i$$

Donde:

B_i es la pendiente de la recta

B_0 es el punto en el que la recta corta el eje vertical.

X_i es el predictor

Y_i es la variable de respuesta

Independiente que la nube de puntos se parezca a o no a una recta, siempre será posible encontrar la recta que cumpla con el criterio de los mínimos cuadrados, por lo que se necesita información adicional para determinar el grado de en qué la recta encontrada explica la relación entre las variables. Para lo anterior se utiliza el coeficiente de determinación R^2 , el cual corresponde al cuadrado del coeficiente de correlación. Se trata de una medida que toma valores entre 0 y 1 (0 cuando las variables son independientes y 1 cuando entre ellas existe relación perfecta). En términos prácticos R^2 es el porcentaje de la variación de la variable de respuesta explicada por la recta encontrada, por lo que lo ideal es que sea lo más cercano a 1 (100%). (Dávila, 2004)

Los resultados de regresión indican la dirección, el tamaño y la significancia estadística de la relación entre un predictor y una respuesta. (Dávila, 2004)

- El signo de cada coeficiente indica la dirección de la relación.
- Los coeficientes representan el cambio de la media en la respuesta para una unidad de cambio en el predictor mientras mantiene constantes otros predictores en el modelo.
- El valor p de cada coeficiente prueba la hipótesis nula de que el coeficiente es igual a cero (no tiene efecto). Por lo tanto, los valores p bajos sugieren que el predictor es una adición significativa a su modelo.
- La ecuación predice nuevas observaciones dados valores predictores específicos.

Por ejemplo, usted trabaja para una compañía de chips de patatas que analiza los factores que afectan el porcentaje de chips desmenuzados por contenedor antes del envío (la variable de respuesta). Usted lleva a cabo el análisis de regresión e incluye el porcentaje de patatas con respecto a otros ingredientes y la temperatura de cocción (centígrados) como su dos predictores. A continuación, se muestra una tabla simplificada de resultados. (Dávila, 2004)

Ecuación de regresión: %Chips rotos = 4.231 - 0.044(%Patata) + 0.023(Temperatura de cocción C). (Software MINITAB Versión 16, 2013)

Predictor	Coeficiente	P
Constante	4.231	0.322
%Patata	-0.044	0.001
Temp. de cocción	0.023	0.020

R^2

Los resultados de regresión indican que ambos predictores son significativos debido a sus valores p bajos. Juntos, los dos predictores conforman el 67.2% de la varianza de chips de patatas rotos. Específicamente:

- Se espera que, por cada aumento del 1% en la cantidad de patatas, el porcentaje de chips rotos baje en 0.044%.
- Por cada aumento de 1 grado centígrado en la temperatura de cocción, se espera que el porcentaje de chips rotos aumente en 0.023%.
- Para predecir el porcentaje de chips rotos para valores de configuración de 50% de patatas y una temperatura de cocción de 175C, usted calcula un valor esperado de 4.831% de chips de patatas rotos.

17 Anexo N°7.

Principales características y componentes del Carbón mineral.

Índice de Hinchamiento.

El carbón tiene grandes variaciones en sus propiedades físicas, las cuales influyen en la facilidad de su manejo. En particular, la mayoría de los carbones se hinchan al calentarlos y el grado de hinchamiento se denomina “número de hinchamiento en crisol” o “índice de hinchamiento libre”. Lo importante de ésta característica es que un carbón con un número de hinchamiento superior a 3 ó 4 podría ocasionar problemas con la combustión en rejilla, salvo que el cargador sea de un diseño especial. El número es, por supuesto, de gran importancia para la coquización. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

El tipo, rango e índice de hinchamiento no definen al carbón cabalmente para el diseño de una central moderna que lo utilice. Algunas propiedades son más importantes que otras, como se indica a continuación. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Energía Específica

La energía específica del carbón también se conoce como poder calorífico o energía térmica. Representa la cantidad de calor que se libera en combustión completa por cada unidad de material quemado. El poder calorífico es una propiedad con grandes variantes entre los carbones, la cual puede influir en forma importante en los requisitos del equipo para manejo y pulverización, así como su almacenamiento. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Humedad

El contenido de humedad de un carbón consta de humedad inherente y libre. La humedad inherente es la humedad combinada y la retenida en los poros del carbón, la cual es una función del rango o categoría del carbón. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

La humedad libre, o externa, es la existente en la superficie del carbón y en los intersticios entre las partículas y es la contribución hecha por las aguas de la mina o la que se agrega con el lavado, supresión del polvo y la lluvia. Esta última humedad normalmente se elimina en los procesos de desaguado y secado del carbón. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

El aumento en la humedad del carbón subirá la capacidad y costo del equipo para su manejo, almacenamiento y pulverización. Además, se puede necesitar equipo calefactor adicional para secar el carbón, según sean el grado y período de la desviación de un alto contenido de humedad. Pueden aumentar las dificultades y costos del manejo del carbón y crecerán los requisitos de potencia. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Tamaño

El tamaño del carbón, la distribución por tamaños y el tamaño máximo, son importantes con respecto a la abrasión y obstrucciones en el sistema de manejo de carbón, para las tendencias de combustión espontánea en las pilas, para los problemas de polvo y para el rendimiento del pulverizador. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

El tamaño máximo de carbón suministrado a los pulverizadores suele ser entre 19 y 75 mm. Hasta un tamaño máximo de unos 75 mm, no se afecta la capacidad de algunos tipos de pulverizadores. Los finos, carbón de un tamaño de 3,35 mm o menos, cuando están mojados, son la causa principal de obstrucciones, en particular cuando su contenido excede de 25% a 30% por masa del total de carbón. La distribución del tamaño de partículas o granulometría varía mucho según el tipo de carbón, método de extracción, limpieza del carbón, equipo para trituración y el grado de manejo y manipulación. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Contenido de Volátiles

Este factor afecta la combustibilidad del carbón pulverizado. La finura requerida aumenta conforme se reduce el contenido de volátiles, lo cual da por resultado que se requiera un considerable aumento en la capacidad de los pulverizadores. Los carbones con bajo contenido de volátiles se inflaman con menos facilidad, necesitan más tiempo para la combustión y por lo tanto aumentan el tiempo de permanencia en el hogar y el volumen. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Triturabilidad

La triturabilidad es el factor que afecta principalmente la capacidad del pulverizador y los costos de trituración o molienda. La capacidad del pulverizador no está en relación lineal con la triturabilidad o molienda. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Abrasividad

Al igual que la triturabilidad, la abrasividad se clasifica sobre una base empírica. El cuarzo y las piritas son los más perjudiciales. La abrasividad del carbón afecta en forma principal el desgaste de los pulverizadores y de los tubos para el carbón pulverizado. Por tanto, se deben proveer costosos materiales resistentes a la abrasión, a fin de reducir los costos de mantenimiento y los paros de la central. La abrasividad no se puede relacionar con la triturabilidad. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Contenido de Cenizas

El contenido de ceniza es el material incombustible del carbón, en formas de materias minerales en el crecimiento de los vegetales iniciales, materiales extraños que penetraron en la yeta durante su formación o rocas atrapadas durante el proceso de extracción. Entre las materias minerales están las que existían en la sustancia vegetal originaria, las que fueron

transportadas por las aguas en la formación e intercaladas entre la sustancia vegetal en descomposición y aquellas materias extrañas. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

La ceniza es la materia inerte del carbón, cuyo exceso rebaja el poder calorífico y disminuye, por tanto, su valor. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Los constituyentes de la ceniza y sus temperaturas de fusión son de máxima importancia para el diseño de las calderas. Las temperaturas de fusión de las cenizas controlan la rapidez de combustión en el hogar y la cantidad de enfriamiento necesaria antes de que los gases entren a la zona de convección. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

El análisis de la ceniza afecta las tendencias de formación de escorias, ensuciamiento y corrosión en el hogar y los conductos para gases y, por ello, tiene una gran influencia en el diseño del cargador y del hogar. El análisis de la ceniza es también un factor importante para determinar la resistividad de la ceniza volante y, por lo tanto, del tamaño del equipo para precipitación electrostática. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

El tamaño, forma y composición de las partículas de ceniza volante se reflejará en el grado de erosión en los conductos para gas y, por lo tanto, influirá en la velocidad máxima de gases que se especificará y tendrá un marcado efecto en las dimensiones y costos de las calderas. Se han ideado varios índices empíricos mediante la combinación de los constituyentes de la ceniza a fin de dar una guía del comportamiento de la ceniza volante en los conductos en el hogar y para los gases. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Oxígeno

La cantidad de oxígeno presente en el carbón afecta sus propiedades. El aumento del tanto por ciento reduce el poder calorífico, y si se trata de carbones grasos disminuye su poder coquizante y conserva un porcentaje más elevado de humedad. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Nitrógeno

El contenido de nitrógeno en los carbones varía entre 1 y 2,5%. Si se destila o carboniza el carbón, alrededor del 15% de nitrógeno se transforma en amoníaco, y más del 50% queda retenido en el coque. En otros tiempos, cuando el método de recuperación de amoníaco tuvo importancia económica, la proporción de nitrógeno del carbón era un dato estratégico, pero hoy, al obtener la mayor parte del amoníaco por síntesis, su contenido no es de gran importancia. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

El nitrógeno del carbón, junto con el nitrógeno del aire para combustión, es el causante de las emisiones de NO_x. Los NO_x térmicos formados por el nitrógeno del aire son una función de la temperatura de la llama. La formación de los NO_x del combustible es más

compleja, pero parece ser menos sensible a las condiciones de combustión. El nitrógeno del combustible es un importante contribuyente a la producción total de NOX. Las medidas requeridas para controlar. Los niveles de tales como combustión por etapas, pueden ser muy costosas para implementarlas. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Azufre

Se encuentra en forma de pirita, como compuestos orgánicos y como sulfatos (CaSO_4). En algunos casos conviene distinguir y determinar la proporción de azufre fijo y volátil. Sin embargo el azufre total rara vez excede de 5% y, a menudo, es inferior al 0,5%. Si el carbón se destina a usos metalúrgicos, el azufre juega un papel importante, ya que se une al metal que se beneficia, afectando sus propiedades. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

El azufre orgánico no se puede eliminar por procedimientos mecánicos, mientras que la pirita en láminas o escamas puede separarse, según sea el grado de trituración o del tamaño en que se encuentre el carbón. Si se trata de carbones con mucha pirita, se producen en los hogares escorias ferruginosas que se adhieren a las parrillas, perturban la buena combustión y desgastan los hogares. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

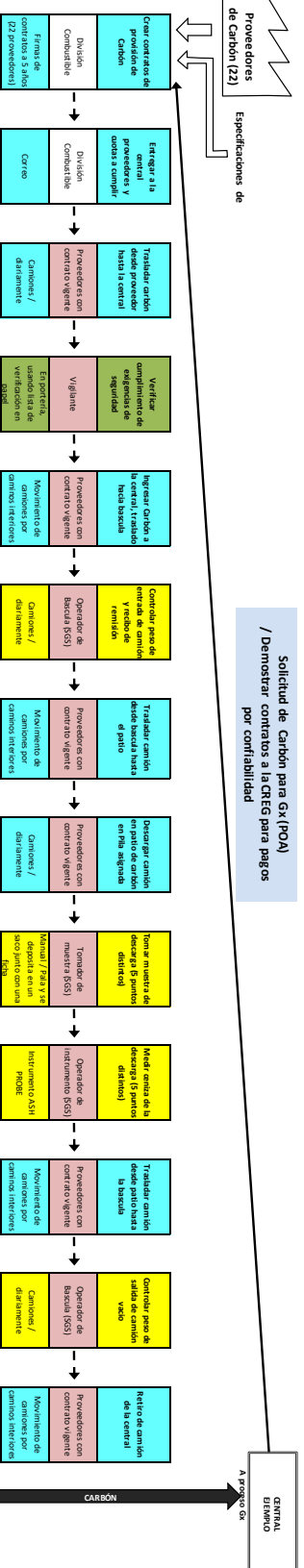
El nivel de emisiones de SO_2 y la precipitabilidad de la ceniza volante son influenciadas por el azufre del carbón y, asimismo, las necesidades y costos de poner en práctica las medidas necesarias para la limpieza. El contenido de azufre también tiene un papel muy importante en la corrosión del precalentador de aire cuyo control puede ser mediante la selección de materiales o la limitación de la temperatura de salida de los gases. El azufre influye en la tendencia a la formación de escoria en los hogares. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

Gases

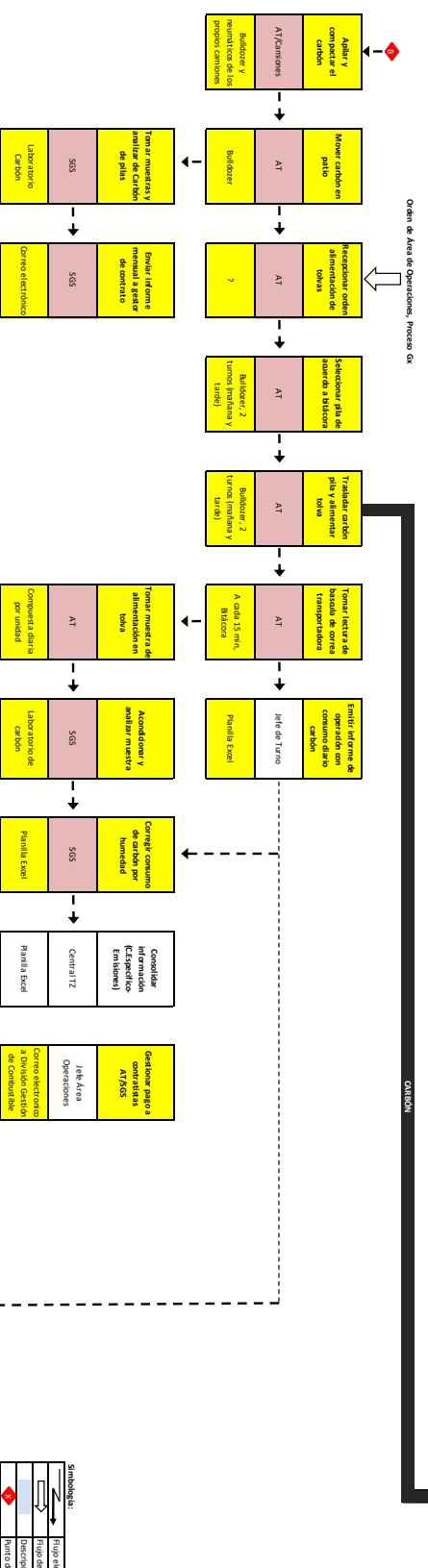
El carbón absorbe cantidades considerables de gases, principalmente metano y otros hidrocarburos saturados. El porcentaje de gas contenido en el carbón y que se desprende bajo temperatura, constituye las materias volátiles, dato fundamental para caracterizar y clasificar un carbón. (Servicio nacional de aprendizaje. (SENA). Colombia, 1998)

PROCESO GESTIÓN DE CARBÓN CENTRO DE PRODUCCIÓN CENTRAL "EJEMPLO"

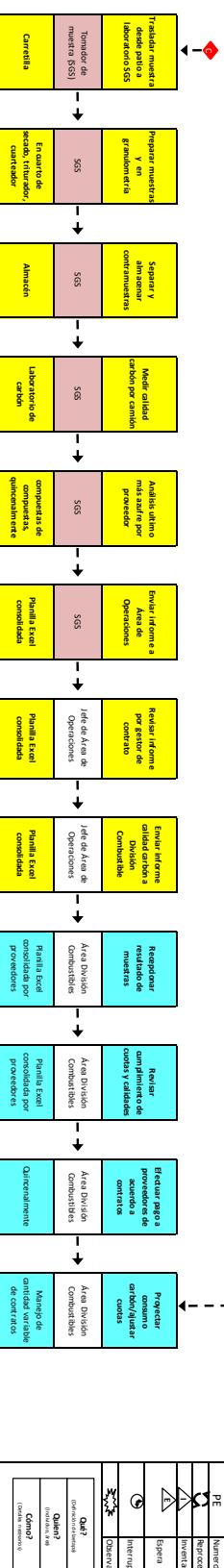
MAPA PROCESO ETAPA DE SUMINISTRO DE CARBÓN, CENTRAL EJEMPLO.



MAPA PROCESO ETAPA OPERACIÓN PATIO DE CARBÓN Y ALIMENTACIÓN DE TOLVAS, CENTRAL EJEMPLO.



MAPA PROCESO ETAPA TOMA DE MUESTRA, ANÁLISIS DE CALIDAD Y PAGO A PROVEEDORES DE CARBÓN, CENTRAL EJEMPLO.



Simbología:

	Riigo electrónico de información
	Riigo de mantenimiento, alarma o producción
	Desagradable de flujo de comunicación
	Punto de unión de flujos de trabajo
	Proceso o línea interna
	Inicio de etapa, Clientes o proveedores
	Tempo de procesamiento
	Numero de personas equivalentes
	Inventario
	Espera
	Interrupción
	Observación, devolución

	Área de Operación
	Centro de Control
	Área de Mantenimiento
	Área de Administración
	División Combustibles
	Empresa Colaboradora

	QA7	Área de Operación
	QA8	Centro de Control
	QA9	Área de Mantenimiento
	QA10	Área de Administración
	QA11	División Combustibles
	QA12	Empresa Colaboradora

DIAGRAMA SIPOC "Proceso de gestión del carbón"

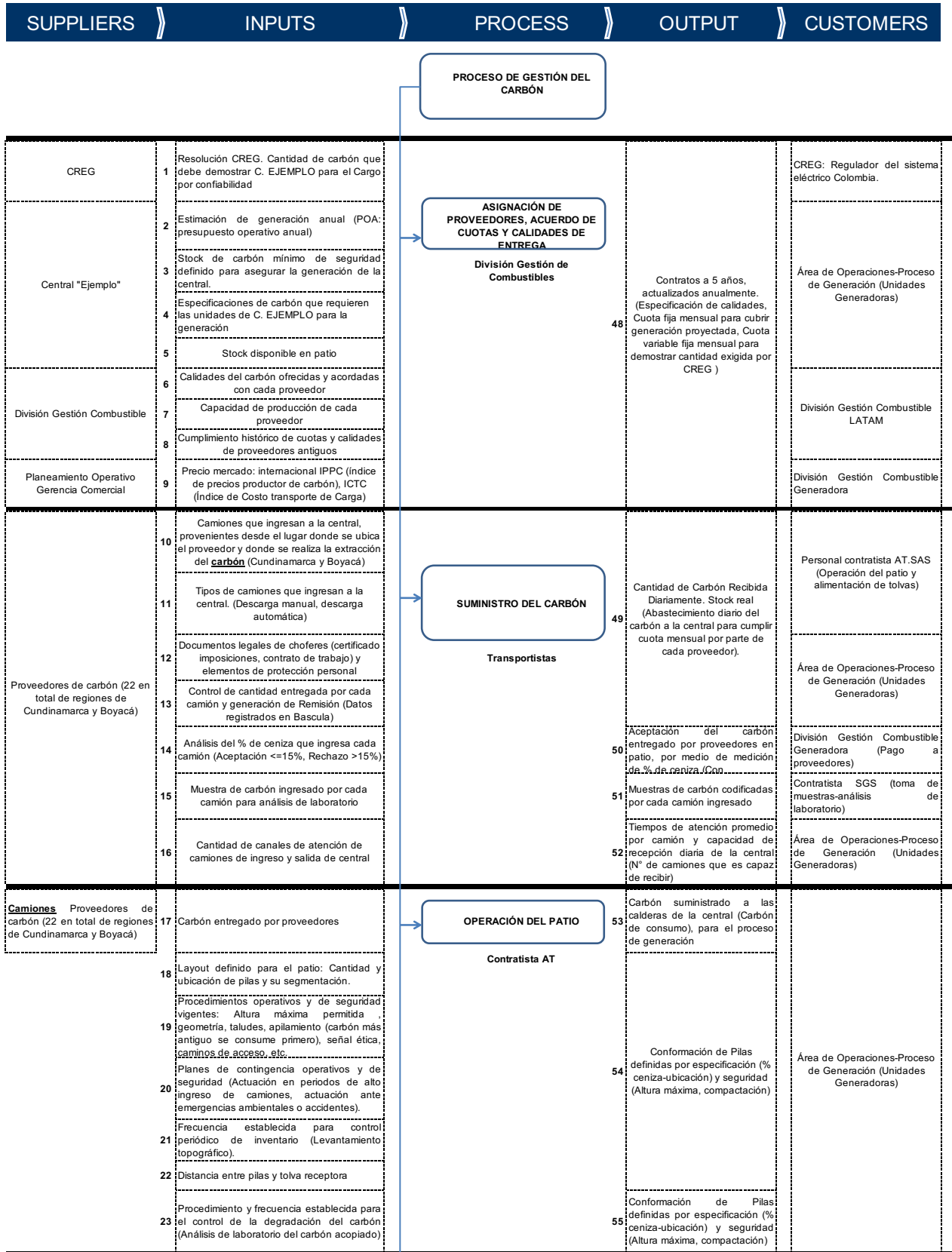


DIAGRAMA SIPOC "Proceso de gestión del carbón"

SUPPLIERS	INPUTS	PROCESS	OUTPUT	CUSTOMERS
<p>Área de Operaciones-Proceso de Generación (Unidades Generadoras)</p> <p>Personal contratista AT.SAS (Operación del patio y alimentación de tolvas)</p>	<p>24 Orden de alimentación de carbón en Bitácora de contratista AT (registran pila, calidad y unidades de generación alimentadas)</p> <p>25 Nivel de tolvas de alimentación de cada unidad de generación</p> <p>26 Instructivo de toma de muestra de carbón de consumo (forma y frecuencia)</p>	<p>ALIMENTACIÓN DE TOLVAS PARA EL PROCESO DE GENERACIÓN</p> <p>Contratista AT</p>	<p>56 Cantidad de carbón en tolva de alimentación cumpliendo de cada unidad con especificaciones de cantidad y calidad (origen de pila de almacenamiento) para la generación</p> <p>57 Muestra de carbón consumido por unidades</p>	<p>Área de Operaciones- Área de resultados - Proceso de Generación (Unidades Generadoras)</p> <p>SGS. Análisis de laboratorio carbón de alimentación o consumo</p> <p>Área de resultados - Proceso de Generación (Unidades Generadoras)</p>
<p>carbón ingresado camiones Proveedores de carbón (22 en total de regiones de Cundinamarca y Boyacá)</p> <p>Contratista AT.SAS (Operación del patio y alimentación de tolvas)</p> <p>Contratista AT.SAS</p>	<p>27 Muestra de carbón entregado por proveedores en pila (Ingreso)</p> <p>28 Muestra de Carbón ingresado a tolvas de alimentación (Consumo)</p> <p>29 Muestra de Inquemados en ceniza volante (tomada en la primera línea del precipitador)</p> <p>30 Procedimiento de toma, manejo y almacenamiento de muestras</p> <p>31 Procedimiento de para el análisis de laboratorio. (Frecuencias y parámetros a medir para la realización análisis próximo y último)</p> <p>32 Procedimiento del método de calculo y formatos para entrega de datos al área comercial que efectúa pago a proveedores</p> <p>33 Procedimiento del método de calculo y formatos para el calculo de consumo específico y emisiones medio ambientales</p> <p>34</p>	<p>TOMA DE MUESTRAS, ANÁLISIS DE LABORATORIO</p> <p>Contratista SGS</p>	<p>58 Análisis próximo (Laboratorio Central) y ultimo (Laboratorio SGS Barranquilla) de calidades de carbón ingresado a patio</p> <p>59 Análisis próximo (Laboratorio Central) y ultimo (Laboratorio SGS Barranquilla) de calidades de carbón ingresado a tolvas de unidades.</p> <p>60 % inquemados obtenidos de la combustión</p> <p>61 Información procesada por Área de Operaciones</p> <p>62 Información procesada por Área de Operaciones</p> <p>63 Información para cálculos de eficiencia</p> <p>64 Información Emisiones ambientales particulado, SO₂, NO_x, CO</p>	<p>Área de Operaciones-Proceso de Generación (Unidades Generadoras) (Calculo de Consumo Especifico, Emisiones)</p> <p>División Gestión Combustible Generadora (Pago a proveedores)</p> <p>División Gestión Combustible Generadora (Pago a proveedores)</p> <p>Área de Operaciones-Proceso de Generación (Calculo de Consumo Especifico)</p> <p>División Medio Ambiente</p>
<p>SGS. Análisis de laboratorio carbón de alimentación o consumo</p> <p>Área de Operaciones-Proceso de Generación (Unidades Generadoras)</p>	<p>35 Información para pago a proveedores: Volúmenes y calidad de carbón suministrado y consumido</p> <p>36 Grado de Cumplimiento de Condiciones contractuales</p>	<p>LIQUIDACIÓN Y PAGO CONTRATISTAS CARBÓN; PATIO CARBÓN Y ANÁLISIS.</p> <p>División Gestión Combustible</p>	<p>65 Pago Contratista Análisis de laboratorio carbón de alimentación o consumo.</p> <p>66 Pago Contratista Operación del patio y alimentación de tolvas.</p> <p>67 Pago proveedores de carbón</p> <p>68 Reporte de Liquidaciones Mensuales.</p>	<p>Contratista SGS.</p> <p>Contratista AT.SAS</p> <p>22 en total de regiones de Cundinamarca y Boyacá</p> <p>Gerencia Comercial Generadora (Calculo Costo Variable), COSTO DE CARBÓN</p>
<p>SGS. Análisis de laboratorio carbón de alimentación o consumo</p> <p>Área de Operaciones-Proceso de Generación (Unidades Generadoras)</p>	<p>37 Información Emisiones ambientales particulado, SO₂, NO_x, CO</p>	<p>EMISIONES AMBIENTALES</p> <p>División Medio Ambiente</p>	<p>69 Informe con indicadores local y corporativo</p>	<p>Consortio</p> <p>Generadora</p> <p>Servicios Técnicos-Medio Ambiente</p>

DIAGRAMA SIPOC "Proceso de gestión del carbón"

SUPPLIERS	INPUTS	PROCESS	OUTPUT	CUSTOMERS	
Bolsa de Energía. EMGESA	38 Precio ofertado por cada unidad y costo marginal de mercado.	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA </div> Área de Operaciones Central TZ			
División Gestión Combustible EMGESA	39 Procedimiento para calculo de costo variable de combustible				
CND. Centro Nacional de Despacho.	40 Orden de generación por merito o por seguridad				
División Gestión Combustible EMGESA / Área de Operaciones Central Tz	41 Stock de carbón				
Área de Operaciones-Proceso de Generación (Unidades Generadoras)	42 Carbón pulverizado impulsado por aire hacia el difusor del quemador de la caldera		70	Energía demanda por XM (Operador del Sistema Eléctrico)	XM: Operador del sistema eléctrico Colombia.
Área de Operaciones-Proceso de Generación (Unidades Generadoras)	43 Oxígeno inyectado al difusor del quemador de la caldera				
Área de Operaciones-Proceso de Generación (Unidades Generadoras)	44 Agua tratada para ciclo Agua-Vapor				
Área de Operaciones-Proceso de Generación (Unidades Generadoras)	45 Agua cruda para enfriamiento del vapor en el Condensador				
Área de Operaciones-Proceso de Generación (Unidades Generadoras)	46 Disponibilidad de las unidades/Desvios del programa de generación		71	Pérdidas del proceso de generación (Inquemados, Make Up, servicios auxiliares, mala transferencia de calor por baja presión condensador, escoria en tubos de caldera, etc)	Gerencia Comercial (Control de Perdidas Método VACE)
Área de Operaciones-Proceso de Generación (Unidades Generadoras)	47 Servicios Auxiliares (Energía eléctrica para alimentar equipos del proceso tales como compresores, bombas, ventiladores, etc)	72	Energía demanda por Central "Ejempl" para sus procesos productivos	Central "Ejemplo"	

Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)

ID	N° de Etapa de Proceso SIPOC	Componente del sistema de Combustión del Carbón y Generación de Energía o descripción de variable del proceso SIPOC	Modo de falla Qué es lo que falló?	Efecto	S E V	Causas	O C C	Control de Detección / Mitigación actual	D E T	R P N	Acción Recomendada	Responsable
1	73, 35	Registro y control de pérdidas del proceso de generación (Make up - purgas, pérdidas por escoria en tubos de caldera - transferencia de calor, atemperación, apego a especificaciones de caldera para el carbón de consumo, etc)	Registro y control inadecuado (no efectuar seguimiento periódico, no tener las mediciones actualizadas)	No se pueden detectar o corregir desviaciones debido a que no hay información adecuada	10	Toma de muestras (quemados), no se toma a periódicamente por unidad	9	No existe control en la actualidad (falta responsable de seguimiento)	10	900	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
2	73, 35	Registro y control de pérdidas del proceso de generación (Make up - purgas, pérdidas por escoria en tubos de caldera - transferencia de calor, atemperación, apego a especificaciones de caldera para el carbón de consumo, etc)	Registro inadecuado (no efectuar seguimiento periódico, no tener las mediciones actualizadas)	No se pueden detectar o corregir desviaciones debido a que no hay información adecuada	9	No se realizan termografías periódicamente para verificar fugas en válvulas y trampas de alta presión de forma periódica (make up)	6	No existe control en la actualidad (Falta responsable de seguimiento)	8	432	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
3	73, 35, 46	Registro y control de pérdidas del proceso de generación (Make up - purgas, pérdidas por escoria en tubos de caldera - transferencia de calor, atemperación, apego a especificaciones de caldera para el carbón de consumo, etc)	Registro inadecuado (no efectuar seguimiento periódico, no tener las mediciones actualizadas)	No se pueden detectar o corregir desviaciones debido a que no hay información adecuada	9	Débil control de saturación de trenes desmineralizadores de PTAD permite la infiltración de sílice en el proceso (no se encuentra habilitado el control automático de saturación de trenes de resina) (aumenta el make up)	9	Hay control del registro manual, falta habilitar el control automático	7	567	Evaluar la mejora planteada y proponer al comité de inversiones	E.S
4	73, 35	Registro y control de pérdidas del proceso de generación (Make up - purgas, pérdidas por escoria en tubos de caldera - transferencia de calor, atemperación, apego a especificaciones de caldera para el carbón de consumo, etc)	Registro inadecuado (no efectuar seguimiento periódico, no tener las mediciones actualizadas)	No se pueden detectar o corregir desviaciones debido a que no hay información adecuada	9	Control de escoria en tuberías de caldera insuficiente, sistema de deshojinado tiene varias unidades fuera de servicio por daño	7	Existe automatismo para el deshojinado en US, U4 y US. En U2 el control es manual	7	441	Evaluar la mejora planteada y proponer al comité de inversiones	E.S
5	73, 35	Registro y control de pérdidas del proceso de generación (Make up - purgas, pérdidas por escoria en tubos de caldera - transferencia de calor, atemperación, apego a especificaciones de caldera para el carbón de consumo, etc)	Registro inadecuado (no efectuar seguimiento periódico, no tener las mediciones actualizadas)	No se pueden detectar o corregir desviaciones debido a que no hay información adecuada	9	Control de escoria en tuberías de caldera insuficiente por frecuencia inadecuada de deshojinado de caldera	9	Supervisión de ejecución de deshojinado por turno y análisis de información para ejecutar deshojinados a condición	7	567	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
6	73, 35	Registro y control de pérdidas del proceso de generación (Make up - purgas, pérdidas por escoria en tubos de caldera - transferencia de calor, atemperación, apego a especificaciones de caldera para el carbón de consumo, etc)	Registro inadecuado (no efectuar seguimiento periódico, no tener las mediciones actualizadas)	No se pueden detectar o corregir desviaciones debido a que no hay información adecuada	7	Instrumentación descalibrada o dañada.	5	Existe programa de mantenimiento (chequeo de calibración). No se ejecuta por limitación de recursos	3	105	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
7	41	Orden de Área de Operaciones para indicar cantidad de carbón a suministrar a cada tolva para la generación, cumpliendo con especificaciones de cada caldera.	Orden no entrega información adecuada para la calidad de carbón requerida	Consumo de carbón con calidades distintas a las requeridas, sin previo análisis.	8	No existe procedimiento adecuado para indicar tipo de carbón a consumir y los responsables de coordinar las acciones	10	Existe Blácora con orden de ingeniero de turno. No existe protocolo o procedimiento con secuencia de acciones que considere las calidades de carbón de inventario y la mezcla a ejecutar para cumplir con la especificación de caldera	8	640	Crear procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
8	35,36	Métodos de cálculo definidos y operativos para: cálculo de eficiencia y cálculo de parámetros medioambientales (Cada 15 días por ej)	Utilización de datos históricos mes anterior (no actualizados con el último análisis efectuado) para correr el método VACE	Calculo estimado no actualizado de la realidad diaria de las unidades.	4	No existen sistemas de información en Línea (Se esta implementando SOLCEP en U2, faltan U3, U4 y U5)	10	Datos entregados por laboratorio de carbones periódicamente (3 a 4 reportes parciales al mes)	3	120	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
9	35,36	Métodos de cálculo definidos y operativos para: cálculo de eficiencia y cálculo de parámetros medioambientales (Cada 15 días por ej)	Método no adecuado para la medición de consumo de carbón	Posible error de medición de carbón de consumo por unidades en armazones y paradas de las unidades	5	Se cuenta con una única medición de consumo de Carbón en banda antes de tolvas. No es posible determinar directamente cuanto consumió cada unidad.	10	Existe un criterio que esta escrito en el procedimiento del método VACE	5	250	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
10	6, 28	Carbón	Parámetros característicos fuera de límites de especificación	Mayor consumo de agua de atemperación y Carbón	5	Aumento de temperatura de vapor por HHV de carbón mayor al especificado	10	Análisis de laboratorio de calidad del carbón tanto de ingreso como para de consumo.	1	50	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
11	6, 28	Carbón	Parámetros característicos fuera de límites de especificación	Pérdida de eficiencia. Mayor consumo	8	Carbón con calidad inferior a la especificación (Degradación por falta de rotación de producto)	7	Análisis en laboratorio de calidad del carbón acopiado en pila se efectúa a petición esporádicamente	9	504	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
12	6, 28	Carbón	Parámetros característicos fuera de límites de especificación	Problemas operativos en el manejo del carbón. Atascos.	9	Utilización de carbón de consumo húmedo, fuera de especificación > 7,5%. Origina problemas en eficiencia y desviación del proceso GX por atascos	9	Análisis de laboratorio de calidad del carbón a diario tanto para ingreso como para el consumo.	2	162	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
13	6, 28	Carbón	Parámetros característicos fuera de límites de especificación	Alto porcentaje de inquemados: - Aumento de pérdidas. - Desviación en el consumo específico	10	Carbón de combustión con características no térmicas, sino metalúrgicas (Factor de hinchamiento PSI > 3,5). Ajustes, (Podría ser debido a estrategia de proveedores para mejorar incentivo)	10	Se tiene medición mensual de laboratorio a proveedores, pero no se toman acciones.	7	700	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	N.S
14	44	Carbón	Parámetros característicos fuera de límites de especificación	Alto porcentaje de inquemados: - Aumento de pérdidas. - Desviación en el consumo específico	10	Mala molienda del carbón de consumo (Finezas) inoperancias en retomos de carbón y clasificación del carbón	10	Análisis por ducto de quemadores, cada semana por molino	9	900	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
15	6, 35, 28	Carbón	Parámetros característicos fuera de límites de especificación	Alto porcentaje de inquemados: - Aumento de pérdidas. - Desviación en el consumo específico	10	Ajuste inadecuado de quemadores aire secundario	8	Análisis periódico de inquemados (Cada 3 aprox.)	6	480	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
16	6, 45, 35	Carbón	Parámetros característicos fuera de límites de especificación	Alto porcentaje de inquemados: - Aumento de pérdidas. - Desviación en el consumo específico	10	Temperatura inadecuada de mezcla aire carbón	3	Hoja de registro diario efectuado por tablerista mecánico.	2	60	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
17	6, 33, 35	Carbón	Parámetros característicos fuera de límites de especificación	Alto porcentaje de inquemados: - Aumento de pérdidas. - Desviación en el consumo específico - Consumo adicional de agua de atemperación	10	Deficiencias en control de calidad de carbón recibido (Acciones sobre la Medición de FSI) Alto valor de especificación de poder calorífico.	9	Análisis periódico mensual de laboratorio de calidad del carbón de ingreso. Análisis de carbón de consumo se efectúa a pedido.	8	720	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H

ID	N° de Etapa de Proceso SIPOC	Componente del sistema de Combustión del Carbón y Generación de Energía o descripción de variable del proceso SIPOC	Modo de falla Qué es lo que falló?	Efecto	S E V	Causas	O C C	Control de Detección / Mitigación actual	D E T	R P N	Acción Recomendada	Responsable
18	6, 4, 33	Caldera	Daño en quemadores y paredes cercanas	Daños en garganta de quemadores y tubería de pared	10	Alto valor de FSI del carbón de consumo produce llama corta concentrando el calor hacia el quemador	7	Se efectúa medición mensual de FSI a provedores y a pedido en pilas. No se toman acciones. El parámetro FSI aunque se declara en especificaciones técnicas no se toma ninguna acción	8	560	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	N.S
19	6, 25, 35	Pila de acopio	Alta humedad (>5%), sumado con carbón con alta fineza (Suelto) en el consumo	- Pérdidas de eficiencia en la combustión.	8	Exposición a intemperie, efectos del clima (Lluvia)	9	No se poseen medidas de mitigación. Se mide pero no se puede corregir.	9	648	Evaluar la mejora de cubierta o techumbre de parte del patio de acopio y proponer al comité de inversiones	E.S
20	6, 25	Pila de acopio	Alta humedad (>5%), sumado con carbón con alta fineza (Suelto) en el consumo	- Desviaciones por atasco en los ductos.	4	Humedad del carbón. Exposición a intemperie, efectos del clima (Lluvia)	8	Control de nivel de molinos. (Sistema monitoreado en tablero mecánico y en opción automático) Alarms por bajo nivel de molino. (En tablero mecánico) Se tienen explosores o cañones de aire sobre las tolvas para hacer fluir el carbón.	2	64	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
21	44	Tolvas de alimentación	Subutilización. Existen 3 tolvas y generalmente solo se utiliza 1.	Potencial mejora para ejecutar mezclas. Cada tolva se alimenta con un tipo de carbón especificado para efectuar mezclas en la banda de alimentación	7	Falta de capacitación del personal	5	No hay plan de capacitación formal.	9	315	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
22	44	Tolvas de alimentación	Subutilización. Existen 3 tolvas y generalmente solo se utiliza 1.	Potencial mejora para ejecutar mezclas. Cada tolva se alimenta con un tipo de carbón especificado para efectuar mezclas en la banda de alimentación	6	Falta de instrucción de ejecución de mezclas	2	No existe control sobre que tolvas utilizar durante la carga de tolvas.	8	96	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
23	44, 29-32	Tolvas de alimentación	Subutilización. Existen 3 tolvas y generalmente solo se utiliza 1.	Potencial mejora para ejecutar mezclas. Cada tolva se alimenta con un tipo de carbón especificado para efectuar mezclas en la banda de alimentación	7	Indisponibilidad de los equipos	8	Los planes de mantenimiento no se ven afectados por la indisponibilidad de tolvas (Generalmente hay un equipo fuera de servicio)	8	448	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
24	44	Tolvas de unidades	Atasco en ductos	- Desviaciones en la generación.	4	Sistema de mitigación (Cañones de aire), no funcionan correctamente (Pérdida de capacidad por superar el N° de accionamientos de diseño)	4	Control de nivel de molinos. (Sistema monitoreado en tablero mecánico y en opción automático) Alarms por bajo nivel de molino. (En tablero mecánico)	2	32	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
25	44	Triturador Primario	Trituración deficiente	Desvío del consumo específico	8	Uso, vida útil excedida de los martillo y placas quebradoras	10	Actividad esta incluida en los planes de mantenimiento anual. Debe revisarse la frecuencia de mantenimiento	3	240	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
26	28,34,44	Banda transportadora	Mal funcionamiento de la bascula de la banda	Medición errónea de la cantidad de carbón consumida.	9	Descalibración.	5	Se calibra cada 6 meses. (Se debe evaluar frecuencia de calibración)	6	270	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
27	28,34,44	Banda transportadora	Mal funcionamiento de la bascula de la banda	Medición errónea de la cantidad de carbón consumida.	7	Tecnología obsoleta	8	No se han tomado acciones por la tecnología y antigüedad de la báscula	8	448	Evaluar reparación o reemplazo de bascula de banda y proponer al comité de inversiones	E.S
28	29-32, 34	Banda transportadora	Indisponibilidad de la bascula mecánica de la banda	No es posible determinar consumos ni calcular pagos al proveedor del patio de Carbón	9	Vida útil excedida.	2	Se detecta cuando ocurre.	10	180	Elaborar procedimiento en caso de contingencia	N.S
29	28,29,32	Banda transportadora	Ausencia de respaldo o equipo de contraste.	-Medición no puede ser validada. -Cálculo de consumo específico puede tener errores a causa del sistema de medición	3	Bascula electrónica de respaldo no es precisa.	9	No se efectúa plan de seguimiento o plan de acción correctivo	9	243	Evaluar incorporar bascula de contraste de características diferentes a la existente, presentar al comité de inversiones	E.S
30	29,32	Banda transportadora	Ubicación poco estratégica. Medición antes de tolvas.	-No es posible medir directamente o instantáneamente el consumo de cada unidad. (Salida de tolva de cada unidad). - Cálculo del consumo por unidad no es directo y presenta desviaciones en los arranques y paradas debido al método de calculo actual.	6	Diseño no consideró medición en cada unidad.	10	Existe un criterio plasmado en un procedimiento para efectuar la medición y descartar mediciones erróneas	2	120	Evaluar la instalación de un medidor Gravimétrico o volumétrico o sistema que disminuya la unidad de generación a la que se alimenta, presentar al comité de inversiones	E.S
31	29-32, 39	Banda transportadora	Muestreo manual inadecuado para el carbón de consumo	- No hay cumplimiento de la norma ASTM. - Muestreo poco representativo.	7	Falta de capacitación al personal	10	No se ha medido la variabilidad del método de medición para validar el consumo específico y las emisiones de CO2	10	700	Evaluar la utilización de qupos automáticos adecuados para toma de muestra, presentar a comité de inversiones	E.S
32	73, 44	Triturador Secador	Trituración deficiente	Desvío del consumo específico	3	Regulación del equipo fuera de especificación	8	No existe un control periódico. No hay plan de regulación	10	240	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
33	73, 44	Triturador Secador	Trituración deficiente	Desvío del consumo específico	8	Uso, vida útil excedida de los martillo y placas quebradoras	4	Actividad esta incluida en los planes de mantenimiento anual	2	64	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	H.S
34	73, 44	Pulverizador	Finezas fuera de especificación	Aumento de pérdidas por inquemados	9	Desgaste de cuerpos moleadores por vida útil	8	Se tiene control operativo que se ejecuta con cierta frecuencia, para el seguimiento de la potencia del molino (Comiente de consumo) en los arranques y en funcionamiento normal.	6	432	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	H.S
35	73, 44	Pulverizador	Finezas fuera de especificación	Aumento de pérdidas por inquemados	9	Tamaño inapropiado de las bolas de cargue y reposición del molino	9	Se tiene procedimiento operativo para carga de cuerpos moleadores.	9	729	-Recomendación del fabricante (tamaño y cantidad) -Reacondicionamiento ciclico de bolas por desgaste	H.S
36	73, 44	Pulverizador	Finezas fuera de especificación	Aumento de pérdidas por inquemados	9	Dureza de carbón menor a 45 en escala HGI	7	Revisar especificación de finesas para las distintas etapas del proceso de molienda	5	315	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
37	73, 44	Clasificadora de Carbón	Finezas fuera de especificación	Aumento de inquemados. Carbón más grueso hacia quemadores (Menor fineza)	9	Pulverización previa inadecuada (desgaste cuerpos moleadores, trituradores con desgaste, etc)	8	Existe procedimiento de toma de muestra de finesas hacia los quemadores, pero no se ejecuta con la frecuencia indicada (se hace a pedido)	6	432	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
38	73, 44	Clasificadora de Carbón	Finezas fuera de especificación	Aumento de inquemados. Carbón más grueso hacia quemadores (Menor fineza)	9	Malta graduación de apertura de clasificadora	7	No existe procedimiento para ajustar las clasificadoras de carbón. Se hace de forma esporádica	5	315	Elaborar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
39	73, 46	Caldera	Presión de vapor fuera del valor nominal (baja)	Mayor consumo específico y mayor consumo de carbón	9	Obsolescencia del control manual U3-U4-U5	10	Mayor control del operador se monitorea en el DCS y en registros de datos operativos	2	180	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual en sala de operaciones	J.H
40	73, 46	Caldera	Presión de vapor fuera del valor nominal (baja)	Mayor consumo específico y mayor consumo de carbón	9	Descalibración de válvulas de seguridad	3	Se detecta cuando ocurre	8	216	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual en sala de operaciones	J.H

ID	N° de Etapa de Proceso SIPOC	Componente del sistema de Combustión del Carbón y Generación de Energía o descripción de variable del proceso SIPOC	Modo de falla Qué es lo que falló?	Efecto	S E V	Causas	O C C	Control de Detección / Mitigación actual	D E T	R P N	Acción Recomendada	Responsable
41	73.46	Caldera	Presión de vapor fuera del valor nominal (baja)	Mayor consumo específico y mayor consumo de carbón	5	Por mal estado de tubería de caldera (medida de precaución)	2	Control establecido por histórico de roturas y por análisis esporádicos de vida remanente de tuberías de calderas	7	70	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual en sala de operaciones	J.H
42	73.46	Caldera	Temperatura de vapor, fuera del valor nominal	Mayor consumo específico y mayor consumo de carbón	9	Mala sintonía (ajuste) del lazo de control	2	Existen alarmas y disparos en el DCS. Existen tendencias de datos en DCS. Existe planilla de registro de datos	1	18	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual en sala de operaciones	J.H
43	73.46	Caldera	Temperatura de vapor, fuera del valor nominal	Mayor consumo específico y mayor consumo de carbón	9	Pase en válvula de atemperación	3	Es difícil detectar aunque ocurra	9	243	Evaluar beneficio de alternativa de colocar instrumentación antes y después de la válvula, presentar a comité de inversión	J.H
44	73.45	Caldera	Oxígeno en caldera fuera del valor nominal (Alto)	Mayor consumo específico y mayor consumo de carbón por alta temperatura de gases de salida de chimenea	9	Control en modo manual U2-U3-U4-U5	4	Existen alarmas y disparos en el DCS. Existen tendencias de datos en DCS. Existe planilla de registro de datos	1	36	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual en sala de operaciones	J.H
45	73.46	Caldera	Pérdida de transferencia de calor a tuberías de agua-vapor por estrangulamiento interno de tuberías	- Pérdida de eficiencia. - Desviación en el consumo específico	8	Escoria interna al interior de tubería de caldera	7	Difícil de detectar. Se deben extraer testigos en distintas secciones de la caldera siguiendo norma ASME	7	392	Revisar procedimiento o instructivo, investigar solución tecnológica, evaluar implantación de la mejora, controlar el resultado de la mejora	J.H
46	73.46	Caldera	Pérdida de transferencia de calor a tuberías de agua-vapor por frecuencia inadecuada del deshojinado	- Pérdida de eficiencia. - Desviación en el consumo específico	9	Escoria impregnada en tuberías de caldera por Deshojinado ineficiente, por daño de los mismos	7	Existe automatismo en U3, U4 y U5, en U2 es manual	7	441	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
47	73.46	Caldera	Pérdida de transferencia de calor a tuberías de agua-vapor por frecuencia inadecuada del deshojinado	- Pérdida de eficiencia. - Desviación en el consumo específico	9	Escoria impregnada en tuberías de caldera a causa de Deshojinado ineficiente por frecuencia inadecuada.	9	Supervisión de ejecución de deshojinado por turno y análisis de información para ejecutar deshojinados a condición	7	567	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual en sala de operaciones	J.H
48	73.44, 39	Caldera	Daños en difusores de quemadores	Aumento de pérdidas por quemadores y producción de NOX	9	Quemadores no adecuados a la tecnología actual	7	Es medianamente fácil de detectar, requiere inspección visión visual.	4	252	Revisar frecuencia indicada en procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
49	73.46	Caldera	Make Up mayor al nominal producto de poder calorífico del carbón mayor al especificado (mayor atemperación)	Mayor consumo de agua de atemperación (mayor consumo de carbón)	5	Aumento de temperatura de vapor por HHV de carbón mayor al especificado	10	Análisis de laboratorio de calidad del carbón tanto para ingreso como para el consumo.	1	50	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
50	73.46	Caldera	Make Up mayor al nominal	Fugas por sobre utilización de purga.	9	Infiltración de silice en el proceso (no esta habilitado el control automático de saturación de trenes de resina)	8	Hay control del registro manual, falta habilitar el control automático	4	288	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
51	73.46	Caldera	Make Up mayor al nominal	Válvulas o trampas de alta presión con fallas de sello. (pase)	9	Válvulas no adecuadas o con daño, impiden ajuste preciso.	8	No se aplica tomografías de forma periódica sino que a pedido	8	576	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	H.S
52	73.46	Caldera	Make Up mayor al nominal	Válvulas o trampas con fallas de sello. (pase)	9	No se realizan tomografías para válvulas y trampas de alta presión de forma periódica (make up)	6	No existe control en la actualidad (falta responsable de seguimiento)	8	432	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual en sala de operaciones	H.S
53	73.46, 49	Caldera - Intercambiadores de calor	Fuera de servicio	Deterioro en la eficiencia del ciclo rankine	9	Método de conservación inadecuado.	8	No hay medición para efectuar control	9	648	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual	H.S
54	73.46, 49	Caldera - Intercambiadores de calor	Fuera de servicio	Deterioro en la eficiencia del ciclo rankine	9	Vida útil superada	2	No hay medición para efectuar control	10	180	Implementar control para evaluar término de vida útil	H.S
55	73.46, 49	Caldera - Intercambiadores de calor	Mal funcionamiento (mala transferencia)	Deterioro en la eficiencia del ciclo rankine	7	Método de conservación inadecuado.	10	No hay medición para efectuar control	9	630	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual	H.S
56	73.46, 49	Caldera - Intercambiadores de calor	Mal funcionamiento (mala transferencia)	Deterioro en la eficiencia del ciclo rankine	7	Vida útil superada	1	No hay medición para efectuar control	10	70	Implementar control para evaluar término de vida útil	H.S
57	73.46, 49	Caldera - Intercambiadores de calor	Mal funcionamiento (mala transferencia)	Deterioro en la eficiencia del ciclo rankine	7	Incorrecia aplicación del procedimiento de puesta en servicio.	1	Procedimiento de puesta en servicio	1	7	Revisar procedimiento o instructivo, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
58	73.46, 49	Caldera - Intercambiadores de calor	Mal funcionamiento (mala transferencia)	Deterioro en la eficiencia del ciclo rankine	7	Incorrecia aplicación del procedimiento de puesta en servicio.	1	Procedimiento de puesta en servicio	1	7	Revisar procedimiento o instructivo, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
59	73.45, 46, 49	Chimenea	Exceso de Oxígeno en chimenea	Mayor consumo específico (Consumo de carbón), por baja transferencia de calor en los precalentadores de aire	9	Infiltración de aire parásito al proceso	4	Existe instrumentación de Oxígeno y T° en el DCS pero no se toma acción	9	324	Implementar control para evaluar término de vida útil	H.S
60	73.46, 49	Auxiliares de turbina	Falla en uno de los calentadores de agua del ciclo de agua-vapor	Disminución de la temperatura de agua de alimentación en la caldera. (mayor consumo de carbón)	9	Conservación húmeda (niveles) y seca inadecuada de los calentadores.	5	De detecta solo cuando ocurre (En la actualidad se tienen los calentadores R4 de alta presión en las U3, U4, fuera de servicio.	7	315	Revisar procedimiento o instructivo de inspección, efectuar mejora al procedimiento, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	H.S
61	73.46, 49	Auxiliares de turbina	Falla en dos o más de los calentadores de agua del ciclo de agua-vapor	Disminución de la temperatura de agua de alimentación en la caldera. (mayor consumo de carbón)	8	Conservación húmeda (niveles) y seca inadecuada de los calentadores.	2	De detecta solo cuando ocurre (En la actualidad se tienen los calentadores R4 de alta presión en las U3, U4, fuera de servicio.	7	112	Revisar procedimiento o instructivo de inspección, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	H.S
62	73.46, 47	Turbina	Pérdida de presión en condensador	Alto consumo de carbón	10	Limpieza en condensador no adecuada (Frecuencia y/o método).	10	Se tienen registros manuales hora a hora de la presión de vacío de condensador. Se cuenta con alarma y disparo en tablero. Se detecta al final, no se toman acciones anticipadamente para mejorar la eficiencia	6	600	Revisar procedimiento o instructivo de inspección, efectuar mejora, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	H.S
63	73.49	Generador (Salida)	Aumento de consumo de servicios auxiliares al interior de la planta	-Mayor consumo de carbón.	5	Sobretutilización de equipos o más equipos de los necesarios en la operación (bombas, motores, ventiladores, correa, etc)	7	Medidores de consumo de SS/AA	3	105	Implementar control con inspecciones programadas para detectar utilización innecesaria de equipos que consumen auxiliares	J.H
64	73.49	Generador (Salida)	Aumento de consumo de servicios auxiliares al interior de la planta	-Mayor consumo de carbón.	2	Aumento de vibraciones en los equipos	6	Fácilmente detectable, siguiendo tendencia en el consumo con los registros manuales. No se efectúa análisis periódicamente	4	48	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual	H.S
65	73.49	Generador (Salida)	Aumento de consumo de servicios auxiliares al interior de la planta	-Mayor consumo de carbón.	6	Ineficiencia de equipos por tecnología obsoleta o por vida útil	10	No es fácil determinar la pérdida de eficiencia en equipos. Se requiere una metodología que no se tiene pero existe	9	540	Revisar metodología asistente y evaluar su aplicación, presentar a comité de innovación	H.S
66	11	Precio mercado/internacional IPPC (índice de precios productor de carbón), ICTC (Índice de Costo transporte de Carga)	Aumento del precio internacional del Carbón	Escasez del carbón local y posible incremento de precio.	5	Mayor demanda de Carbón en el mercado mundial e interno	7	No hay indicador control aserivo para poder detectar	9	315	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual	N.S
67	40	Actualización y/o revisión periódica del precio ofertado por cada unidad (Función del costo variable del combustible, curvas de eficiencia de máquinas y otras variables)	Costos declarados no actualizados producto de cambios en el comportamiento de eficiencia y precio de inventario	Error de calculo en margen variable por desconocimiento de un menor ó mayor costo variable (mayor o menor utilidad)	5	No hay revisión periódica de las curvas de eficiencia de las máquinas o del calculo del costo variable de combustible.	8	Existe control pero no hay actualización de las curvas de eficiencia periódicamente	2	80	Implementar control de esta actividad, crear objetivo 2014	A.M

ID	N° de Etapa de Proceso SIPOC	Componente del sistema de Combustión del Carbón y Generación de Energía o descripción de variable del proceso SIPOC	Modo de falla Qué es lo que falló?	Efecto	S E V	Causas	O C C	Control de Detección / Mitigación actual	D E T	R P N	Acción Recomendada	Responsable
68	43	Stock disponible en patio	Stock menor al mínimo de seguridad (Actualmente no está definido)	No se puede generar por falta de combustible. Multas, sanciones del regulador (pérdida de cargo por confiabilidad), pérdidas por energía no vendida o por mayores costos por compra de energía en mercado spot	10	-Posible escasez de carbón en el mercado. -Reacción tardía de logística de suministro	6	Existe seguimiento de nivel de inventario diario pero existe alta incertidumbre en proyecciones de Gx térmica	6	360	Implementar control de esta actividad. Comité de expertos para analizar entorno	N.S
69	43	Stock disponible en patio	Stock menor al mínimo de seguridad	No se puede generar por falta de combustible. Multas, sanciones del regulador (pérdida de cargo por confiabilidad), pérdidas por energía no vendida o por mayores costos por compra de energía en mercado spot	10	Huelgas y protestas internas del país	6	No existe control para anticiparse. Se detecta cuando ocurre	10	600	Implementar control de esta actividad. Comité de expertos para analizar entorno	N.S
70	43	Stock disponible en patio	Stock menor al mínimo de seguridad	No se puede generar por falta de combustible. Multas, sanciones del regulador (pérdida de cargo por confiabilidad), pérdidas por energía no vendida o por mayores costos por compra de energía en mercado spot	10	Error en estimación de compra.	1	Existe control, pero no es fácil cambiar aspectos contractuales	6	60	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual	N.S
71	43	Stock disponible en patio	Stock menor al mínimo de seguridad	No se puede generar por falta de combustible. Multas, sanciones del regulador (pérdida de cargo por confiabilidad), pérdidas por energía no vendida o por mayores costos por compra de energía en mercado spot	10	Políticas de reducción de costos en la organización	5	Existe control del inventario pero se debe cumplir con lineamientos de la compañía	8	400	Revisar política de compra con responsable LatAm	N.S
72	43	Stock disponible en patio	Stock menor al mínimo de seguridad	No se puede generar por falta de combustible. Multas, sanciones del regulador (pérdida de cargo por confiabilidad), pérdidas por energía no vendida o por mayores costos por compra de energía en mercado spot	10	Fenómeno climático (niño)	5	Es posible detectarlo 2 meses antes que ocurra	7	350	Implementar control de esta actividad. Comité de expertos para analizar entorno	N.S
73	43	Stock disponible en patio	Stock mayor al máximo de acopio	Mayor costo de inventario.	5	Error en estimación de generación (Traducida a consumo de carbón)	8	Se detecta cuando no se cumple la generación proyectada	7	280	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual	N.S
74	43	Stock disponible en patio	Stock mayor al máximo de acopio	Mayor riesgo de accidentes.	1	Altura, compactación, taludes de pilas.	2	Existe control de nivel de inventario, pero no hay control permanente de operaciones de patio por parte de EMGESA	5	10	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual	J.H
75	43, 25	Stock disponible en patio	Stock mayor al máximo de acopio	Degradación del carbón, por mayor tiempo de acopio, pérdida de valor	3	Acopio a la intemperie (lluvia, viento).	5	No existe control que permita tomar decisiones a tiempo	10	150	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual	J.H
76	34	Métodos de cálculo definidos y operativos para pago de proveedores y contratistas de patio	Errores en facturación a proveedores	- Reclamo de proveedores por errores en los pagos. - Pérdidas por facturación mayor a la real	8	Errores en el cálculo de cantidades y calidades entregadas por proveedores	5	Existe control y método de cálculo definido y operativo	2	80	Evaluar implementar un software que impida digitación manual o intervención de la información, presentar a comité de inversiones	N.S
77	4	Especificaciones de carbón que requieren las unidades de Ejemplo para la generación	Especificación de las máquinas desconocida y desactualizada	Precio de compra puede ser mayor al requerido si las calidades son superiores a la especificación, pero puede haber menor consumo de combustible	9	No hay estudios detallados de la calidad de carbón que necesita actualmente cada unidad. Existen especificaciones de fábrica pero por antigüedad y uso se deben revisar	10	No existe criterios ni procedimientos para el cargo de calidades por máquina para cumplir especificación.	10	900	Efectuar estudio técnico de calidades de carbón que requieren en la actualidad las unidades de generación, óptimo Técnico-Económico	N.S, J.H
78	4	Especificaciones de carbón que requieren las unidades de Ejemplo para la generación	Especificación de las máquinas desconocida y desactualizada	Mayor consumo de carbón ó sobre el nivel nominal, si las calidades compradas son inferiores a la especificación.	9	La especificación de fábrica no se considera un factor relevante en la decisión de compra	10	No existe criterios ni procedimientos para el cargo de calidades por máquina para cumplir especificación.	10	900	Con el estudio técnico, efectuar procedimiento o instructivo de inspección, efectuar mejora al procedimiento, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	H.S
79	4	Especificaciones de carbón que requieren las unidades de Ejemplo para la generación	Calidades entregadas superiores a las especificaciones contractuales	Precio de compra mayor si las calidades son superiores a la especificación y se bonifica la mejor calidad.	7	Calidades del carbón entregadas por los proveedores superan la calidad contratada.	5	Existente control de calidades de laboratorio quincenales	3	105	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual. Revisar especificaciones de compra	J.H, N.S
80	4	Especificaciones de carbón que requieren las unidades de Ejemplo para la generación	Calidades no se ajustan a las especificaciones contractuales	Mayor consumo de carbón ó sobre el nivel nominal, si las calidades compradas son inferiores a la especificación.	7	Calidades del carbón entregadas por los proveedores están bajo la calidad contratada.	5	Existente control de calidades de laboratorio quincenales	3	105	Implementar control de esta actividad, crear indicador y gestión visual. Revisar especificaciones de compra	J.H, N.S
81	17	Toma de muestra para análisis de laboratorio de calidades de entrega	Errores en medición de calidades entregadas por proveedores	Errores en el cálculo de pago a proveedores	10	Condiciones inadecuadas para el trabajo de muestreo. (Intemperie, lluvia, sol, proveedor presente en el lugar de la toma de muestra)	7	No se puede detectar con los controles actuales	10	700	Implementar control de esta actividad junto con Área de Seguridad Laboral	J.H, N.S, J.P
82	17	Análisis de laboratorio de calidades de entrega	Errores en medición de calidades entregadas por proveedores	Errores en el cálculo de pago a proveedores	10	- Equipos antiguos, requieren modernización. Se descalbran frecuentemente - Laboratorio en malas condiciones para función que cumple	8	Se detecta cuando ocurre	10	800	Implementar control de esta actividad, crear instructivo de control de liquidaciones e indicador de seguimiento.	J.H, N.S
83	17	Control de cantidad de ingreso de carbón	Errores de digitación o interpretación de la medición de la balanza	Errores en el pago a proveedores y en el control de la cantidad de inventario	10	Sistema computacional con debilidades para evitar errores de digitación del operador (planilla Excel)	8	Se detecta error cuando el proveedor se queja	10	800	Evaluar implementar un software que impida digitación manual o intervención de la información, presentar a comité de inversiones	N.S
84	26, 24	Orden de Área de Operaciones para indicar cantidad de carbón a suministrar a cada tolva para la generación, cumpliendo con especificaciones de cada caldera.	Orden emitida no incluye la mezcla óptima, de acuerdo al carbón disponible, para alimentar las tolvas de acuerdo a especificaciones de fábrica.	Utilización no óptima del inventario. - Degradación de carbón menos utilizado. - Mezcla ineficiente.	10	No existe un modelo de mezcla óptima de carbones. No están identificadas las pilas	10	Se detecta cuando se consume	7	700	Crear procedimiento o instructivo, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H
85	26, 24	Orden de Área de Operaciones para indicar cantidad de carbón a suministrar a cada tolva para la generación, cumpliendo con especificaciones de cada caldera.	Orden emitida no incluye la mezcla óptima, de acuerdo al carbón disponible, para alimentar las tolvas de acuerdo a especificaciones de fábrica.	Utilización no óptima del inventario. - Degradación de carbón menos utilizado. - Mezcla ineficiente.	10	No existe un procedimiento o instructivo que indique la secuencia de acciones y la mejor manera de efectuar mezclas. Equipos a utilizar, responsabilidades.	10	Se detecta cuando se consume	7	700	Crear procedimiento o instructivo, implementar mejora, controlar cumplimiento de la modificación	J.H, N.S

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	----

Plan de medición y control de variables críticas del proceso de Gestión del Combustible Carbón en Central Ejemplo

Nombre del proceso:	Gestión del Combustible Carbón, etapa de consumo y combustión
Áreas:	Operaciones Central Ejemplo
Duño del proceso:	J.H

Código del documento:	TP-O-45
Version:	1
Fecha:	Mar, 2014

Aprobado por:	Gerente de Explotación
Elaborado por:	Equipo de mejora.

Parámetro a controlar	Característica a controlar	Especificación a controlar	Frecuencia de control	Quien Controla	Donde Registra	Acción correctiva
Características de la mezcla de carbón de consumo	Poder calorífico superior (HHV) del carbón consumo	6900-kcal/kg-7100 (U2) 6200-kcal/kg-6400 (U3/U4/U5)	Toma de muestra- Diaria. Análisis de laboratorio- Semanal	Operador Turno Tarde. Dia martes de cada semana	Franja Informe mensual de resultado. (PWR)	Resultados fuera de rango, ejecutar modelo de cálculo mezcla optima y corregir orden al contratista para alimentación de carbón a tolvas
	Porcentaje de Ceniza del carbón de consumo	< 15%	Toma de muestra- Diaria. Análisis de laboratorio- Semanal	Operador Turno Tarde. Dia martes de cada semana	Franja Informe mensual de resultado (PMR)	a) Resultados fuera de rango, ejecutar modelo de cálculo mezcla optima y corregir orden al contratista para alimentación de carbón a tolvas. b) Enviar correo a jefe de Operaciones con copia a División Combustible, reportando el suceso.
	Granulometría del carbón pulverizado	100% < malla 200	Diaria	Operador Turno Tarde.	Franja Informe diario de operaciones (PIDO) Sistema SAP. Avisos para mantenimiento	a) Ordenar inspección de calibración de clasificadora de proceso y control de amperaje del molino. b) Efectuar corrección al ajuste de apertura clasificadora a velocidad del molino. c) Crear aviso para mantenimiento para la revisión del estado y cantidad de sacos moledores.
	% de Humedad total del carbón de consumo	< 5%	En cada turno de operación	Operador Turno.	Brigada de turno. Franja Informe diario de operaciones (PIDO)	a) Control de nivel de molinos. (Sistema monitoreado en tablero mecánico) b) Activar explosores o cañones de aire sobre las tolvas para hacer fluir el carbón en caso de alta humedad.
Variables de control operacional de la etapa de combustión	Índice de Hinchamiento (FSI)	< 3.5	Toma de muestra- Diaria. Análisis de laboratorio- Semanal	Operador Turno Tarde. Dia martes de cada semana	Franja Informe mensual de resultado (PMR)	a) Resultados fuera de rango, ejecutar modelo de cálculo mezcla optima y corregir orden al contratista para alimentación de carbón a tolvas. b) Enviar correo a jefe de Operaciones con copia a División Combustible, reportando el suceso.
	% de oxígeno en mezcla de aire-carbón en la combustión	Depende del poder calorífico y porcentaje de ceniza del carbón de consumo.	En cada turno de operación	Operador Turno.	Brigada de turno. Franja Informe diario de operaciones (PIDO)	Efectuar medición manual e inspección visual con operador de terreno de Temperatura de entrada y salida de precalentadores de aire.
Temperatura del Aire de combustión en el siflicor	Depende del poder calorífico y porcentaje de ceniza del carbón de consumo.	En cada turno de operación	Operador Turno.	Brigada de turno. Franja Informe diario de operaciones (PIDO)	Efectuar medición manual e inspección visual con operador de terreno de Temperatura de entrada y salida de precalentadores de aire.	

Nombre del proceso:	Gestión del Combustible Carbon, etapa de consumo y combustión
Areas:	Operaciones Central Ejemplo
Duño del proceso:	J.H

Código del documento:	TPD-045
Version:	1
Fecha:	Mar. 2014

Aprobado por:	Gerente de Explotación
Elaborado por:	Equipo de mejora.

Parámetro a controlar	Característica a controlar	Especificación a controlar	Frecuencia de control	Quien Controla	Donde Registra	Acción correctiva
Control de Perdidas en el Proceso	Consumo específico de carbón en unidades de generación	UP-3,024 kcal/kWh UA-3,282 kcal/kWh UA-3,198 kcal/kWh US-3,087 kcal/kWh	Diario, siempre que se establezcan las condiciones indicadas en método YACE (plena carga estable durante al menos 120 min)	Analista de resultados	Franja informe diario de operaciones (PIDO)	Verificar resultados de mediciones de variables independientes X's señaladas en este plan de control, informar a encargado de operaciones y asegurar la realización de las acciones señaladas en cada caso.
	Porcentaje de Impurezas en la combustión	< 8%	Diaria	Operador Turno Tarde.	Franja informe diario de operaciones (PIDO)	a) Efectuar acciones señaladas para FSI Y Granulometría del carbón pulverizado. b) Verificar ajuste de quemadores de aire secundario. c) Efectuar acción indicada para la "Temperatura del Aire de combustión en el difusor".
	Presión de Vapor Principal	<88,7 kg/cm2 y > 85 kg/cm2	En cada turno de operación	Operador Turno.	Bizcora de turno. Franja informe diario de operaciones (PIDO) Sistema SAP. Avisos para mantenimiento	a) Verificar parámetros de combustión y efectuar control de cantidad de carbón (reducir cantidad en caso de poder aliviarlo sobre el valor deseado y aumentar cantidad en caso contrario). b) Para valores de Presión bajo el mínimo. Abrir aviso a mantenimiento para verificar estado y aumentar frecuencia de desbalfinado. (Control de amulación de
	Temperatura de vapor principal	<= 510 °C	En cada turno de operación	Operador Turno.	Bizcora de turno. Franja informe diario de operaciones (PIDO)	Controlar parámetros de combustión y efectuar control de cantidad de carbón (reducir cantidad en caso de poder aliviarlo alto)
Control de Perdidas en el Proceso	Nivel de oxígeno al interior de la chimenea	< 2%	En cada turno de operación	Operador Turno.	Bizcora de turno. Franja informe diario de operaciones (PIDO)	Efectuar medición manual e inspección visual con operador de terreno, verificar infiltración de aire paravento al proceso por efectuar verificar apertura de paravento de purgas (aumento de silice en vapor)
	Make up del ciclo agua vapor	Consumo real de agua (Qaap) / Consumo de diseño (Qaap) > 95%	Diario	Ingeniero Químico de la central	Bizcora de turno. Franja informe diario de operaciones (PIDO)	Revisar saturación de trenes desmineralizadores y funcionamiento de automatismo de los mismos. b) Efectuar termografías para descartar paso de válvulas, lampas de alta presión y filtraciones en tuberías en el
	Presión del Condensador	<=5,5 kg/cm2 y > 5,3 kg/cm2	Diario	Ingeniero Químico de la central	Bizcora de turno. Franja informe diario de operaciones (PIDO)	a) Verificar última limpieza del condensador. Crear aviso para mantenimiento para programar limpieza e inspección para verificación de hermeticidad.
Servicios Auxiliares consumidos	< 5% de energía generada	En cada turno de operación	Operador Turno.	Bizcora de turno. Franja informe diario de operaciones (PIDO)	Efectuar inspección visual y de sistema de control para verificar equipos encendidos sin necesidad (ventiladores de torres de enfriamiento, correa transportadora de carbón, etc)	