



FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MEDIOAMBIENTE  
INGENIERÍA AMBIENTAL

---

# **ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS POLICRISTALINOS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**DIEGO ANTONIO BASCUÑÁN ROMÁN**

**PROFESOR GUÍA: MARÍA LORENA ÁLVAREZ SÁNCHEZ**

---

**Valparaíso, 2021**

# Resumen

Las energías renovables en Chile toman cada vez más fuerza en busca del cambio a una matriz energética con Energías Renovables No Convencionales únicamente, aportando en contra del cambio climática actual de nuestro planeta. La energía solar fotovoltaica es una de las que lidera el mercado, llegando a más del 50% de la producción de energías renovables.

A pesar de que estas energías renovables en su uso no emiten emisiones que pueden ser perjudiciales en la calidad del aire, agua, suelo y salud humana entre otros impactos, se debe considerar que previo a su uso si existen procesos en los cuales se emiten contaminantes, haciendo parte de estas emisiones a la implementación de energía solar. El principal producto encargado de generar energía solar son los paneles solares, éstos en su ciclo de vida generan emisiones ya sea por actividades indirectas o directas, que no pueden quedar ajenas, la obtención de materias primas, la fabricación del producto, el uso y reciclaje son etapas contempladas en la metodología del Análisis de Ciclo de Vida. Con el uso de esta herramienta de gestión se logra identificar de que proceso provoca la mayor cantidad de emisiones, procesos que se pueden mejorar, pasivos ambientales que se producirán tales como la acumulación de paneles solares en desuso luego de cumplir su vida útil y realizar recomendaciones para minimizar los impactos ambientales provocados a lo largo del ciclo de vida.

En Chile ya existen plantas en funcionamiento, su implementación fue en busca de la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>, pero previo a esto no se consideró ningún estudio completo para ver que su fabricación contemple un desarrollo sostenible desde el inicio de la obtención de productos para su generación dejando una falencia ambientalmente hablando. Con el fin de contribuir a la discusión de esta problemática, se realizó un estudio de Análisis de Ciclo de Vida para determinar los procesos con mayores emisiones provocadas en la fabricación de paneles solares y también los impactos potenciales de dichas emisiones tanto ambiental como en la salud humana, además de poder plantear recomendaciones para la identificación de procesos más contaminantes.

Los resultados muestran que en la actualidad existen procesos como la fabricación de vidrio y aluminio que emiten grandes cantidades de CO<sub>2</sub> como también de otros contaminantes teniendo la mayor variedad en el total de los procesos, que van de la mano con la cantidad de impactos ambientales significativos que provocan. También la identificación de procesos de un uso energético alto tales como el Templado, Polimerización, Siemens y Hall – Heroúlt. Para esto se plantean recomendaciones como la ocupación de equipos de abatimiento para la reducción de emisiones, cambio en la matriz energético del uso de energía en los procesos por energías renovables y cambio o mejora tecnológicas de los equipos y procesos.

Finalmente, con los resultados, discusiones y recomendaciones se concluyó que el uso de paneles solares fotovoltaicos policristalinos en Chile para la generación de energía no generara más emisiones que las provocadas por energías no renovables en su etapa de uso, marcando un buen presente y futuro para el cambio de matriz energética que se propone como meta país para el 2050.

# Listado de Acrónimos y Glosario

Para los fines de este documento se aplican los términos y definiciones que se detallan a continuación para una mejor comprensión.

## A. Términos

A.1 ACV: Análisis de ciclo de vida

A.2 EVA: Etil Vinil Acetato

A.3 SEN: Sistema eléctrico nacional

A.4 ERNC: Energías Renovables No Convencionales

A.5 GEI: Gases de efecto invernadero

A.6 Productos: Cualquier bien o servicio

A.7 Coproducto: Cualquier producto de entre dos o más productos provenientes del mismo proceso unitario o sistema del producto

A.8 Proceso: Conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados

A.9 Flujo elemental: Materia o energía que entra al sistema bajo estudio, que se extrae del medioambiente sin una transformación previa por el ser humano, o una materia o energía que sale del sistema bajo estudio, que es liberado al medioambiente sin una transformación posterior por el ser humano.

A.10 Flujo de energía: Entrada o salida de un proceso unitario o un sistema del producto, expresado en unidades de energía.

A.11 Materia Prima: Materia primaria que se utiliza para elaborar un producto

A.12 Entrada auxiliar: Materia que entra y se utiliza en el proceso unitario de obtención del producto, pero no constituye una parte del producto.

A.13 Asignación: Distribución de flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes.

A.14 Calidad de datos: Característica de los datos que se relaciona con su capacidad para satisfacer los requisitos establecidos

A.15 Unidad funcional: Desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia

A.16 Entrada: Flujo de producto, de materia o de energía que entra en un proceso unitario

- A.17 Salida: Flujo de producto, de materia o de energía que sale de un proceso unitario
- A.18 Sistema del producto: Conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto, que desempeña una o más funciones definidas y que sirve de modelo para el ciclo de Vidal del producto.
- A.19 IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
- A.20 AP42: Compilation of Air Pollutant Emissions Factors
- A.21 US-EPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

## **B. Definiciones**

- B.1 Ciclo de vida: Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.
- B.2 Adquisición de materias primas: Todas las actividades necesarias para la extracción de las materias primas y las aportaciones de energía del medio ambiente, incluyendo el transporte previo a la producción.
- B.3 Proceso y fabricación: Actividades necesarias para convertir las materias primas y energía en el producto deseado. En la práctica esta etapa se compone de una serie de subetapas con productos intermedios que se forman a lo largo de la cadena del proceso.
- B.4 Distribución y transporte: Traslado del producto final al cliente.
- B.5 Uso, reutilización y mantenimiento: Utilización del producto acabado a lo largo de su vida en servicio.
- B.6 Reciclaje: Comienza una vez que el producto ha servido para su función inicial y consecuentemente se recicla a través del mismo sistema de producto (ciclo cerrado de reciclaje) o entra en un nuevo sistema de producto (ciclo de reciclaje abierto).
- B.7 Evaluación de impacto ambiental: herramienta para la toma de decisiones que incluye la identificación, cuantificación y valoración de los impactos ambientales asociados a un proyecto.
- B.8 Aspecto Ambiental: Elemento de actividades, productos o servicios de una organización que puede interactuar con el medio ambiente.

# Agradecimientos

Se me hace muy difícil mencionar a cada una de las personas que me han apoyado en este largo camino que hace un par de años decidí comenzar. Aun así, no puedo dejar gente fuera de estos párrafos y dedicar un par de palabras.

Le agradezco a mis amigos de toda mi vida, que conocí en un salón de clases en mi etapa escolar, cada uno de ellos me hizo crecer como niño aprendiendo mis primeros valores como ente social y transformándome en un pequeño desordenado pero feliz. Ustedes nunca desaparecieron desde que los conocí en mi vida y siempre aportaron risas y sonrisas a mi vida, Jasa, Feña, Martín, Tomi, Vale, Gabriela, Aníbal, María Paz, Gringa, Vicho, Matifranco, Mati Orellana, Omar y podría seguir mencionando mis grandes amigos que se han cruzado en mi camino.

A mis amigos y futuros colegas de universidad por cada rabia que pasamos en conjunto, por cada alegría por aprobar con 4.0 un ramo, por cada carrete en Laguna Verde y Valparaíso, destacando a Pati como un pilar fundamental a lo largo de mi carrera, Pollo por su aporte genuino sobre todo en mi etapa de tesis, Ariel por criarme ser un padre enseñándome que nunca un ramo estaba perdido, que hay que pelearlo hasta el final y mis demás locos amigos de universidad que se convirtieron en mi familia universitaria. No puedo dejar fuera a Bárbara mi partner en la mayor parte universitaria gracias por siempre estar ahí en mis momentos malos y buenos, sufrimos y disfrutamos juntos hasta lograr pensar en lo capaces que éramos para desempeñarnos como Ingenieros Ambientales, el futuro que nos espera como personal y profesionales es tremendo, que nadie nunca nos quite las ganas de ser los mejores del mundo en el ámbito profesional porque en la perspectiva de vida ya tenemos que estar dentro de los mejores. Hoy soy lo que soy por lo aprendido gracias a ti.

Al equipo de Coca – Cola en gran parte a los chicos de Ecológica que compartieron mis procesos de practica no solo enseñándome de un desempeño profesional sino también de la vida, demostrándome lo sacrificado del trabajo y de sus propias vidas y haciéndome recordar de la gran oportunidad que tenia de convertirme en un profesional, de verdad muchas gracias por darme la gran motivación que necesitaba para la última etapa de mi carrera.

A mis profesores, créanme que a pesar de muchas veces sufrir en sus ramos rescato lo positivo de sus labores, sufrí y llore en su momento, pero a día de hoy agradezco haber pasado por eso, crecí como alumno y profesional. Mi profesora guía, con la que quedo en deuda por toda la ayuda brindada siempre sin pedir nada a cambio, compartiendo su conocimiento y experiencia conmigo, la confianza que me entrego me hizo pensar como profesional y ver que no hay límites cuando se abre la mente. Al profesor Héctor Andrade por su forma de transmitir energía y conocimiento aprendí lo que me faltaba no solo me dio alternativas para problemáticas, sino que seguridad y certeza de que lo que haga va a estar bien. Finalmente, al profesor Hugo Diaz por todo lo que me enseño desde el primer día de universidad hasta hoy, un gran ejemplo a seguir para conseguir mis metas.

A mi familia mi vieja, por siempre consentirme y entenderme, por no darme la espalda nunca y ser la mejor madre del mundo. A mi viejo por enseñarme responsabilidad, respeto, humildad y formarme como hombre y ser el mejor padre del mundo. A mi hermana por ser mi ejemplo de vida, te debo mucho en esta vida, sé que nunca me dejaras solo. A mis perritos que extraño mucho Rufo y Chipi no saben cuánto me encantaría volver a verlos. Mi familia, mi hogar los amo.

Para todos este triunfo no es mío es compartido, cada uno de ustedes siéntase exitoso por forjar a Diego como una gran persona. Hoy subo un escalón de éxito y a la vez dos de humildad.

# Índice General

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Energías no renovables .....	8
1.2	Energía Solar Fotovoltaica.....	9
1.3	Celdas solares de Silicio.....	12
1.4	EVA (Etilvinilacetato).....	13
1.5	Vidrio templado.....	14
1.6	Marcos y soportes de Aluminio.....	15
1.7	Huella de carbono .....	16
1.8	Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	18
2.	PROBLEMA .....	20
3.	OBJETIVOS .....	21
3.1	Objetivo General .....	21
3.2	Objetivos Específicos.....	21
4.	METODOLOGÍA.....	22
4.1	Fase de definición del objetivo y el alcance .....	23
4.2	Fase de análisis de inventario .....	25
4.3	Fase de evaluación del impacto ambiental .....	27
4.4	Fase de interpretación .....	32
5.	RESULTADOS .....	33
5.1	Fase de definición del objetivo y alcance.....	33
5.1.1	Objetivo .....	33
5.1.2	Función del sistema.....	33
5.1.3	Unidad funcional .....	33
5.1.4	Límites del sistema .....	34
5.1.5	Requisitos de calidad de datos.....	36
5.2	Fase de Análisis de inventario .....	37
5.2.1	Obtención de materias primas.....	37
5.2.1.1	Vidrio Templado .....	37
5.2.1.2	Marcos de Aluminio .....	42
5.2.1.3	Etil Vinil Acetato (EVA) .....	45

5.2.1.4	Fabricación de Silicio de Grado Eléctrico .....	48
5.2.2	Producción de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos.....	50
5.2.3	Uso.....	54
5.2.4	Reciclaje.....	55
5.3	Fase de evaluación del impacto ambiental .....	57
5.3.1	Obtención de materias primas.....	57
5.3.1.1	Fabricación de Vidrio Templado .....	57
5.3.1.2	Fabricación de Marcos de aluminio .....	59
5.3.1.3	Fabricación de EVA.....	60
5.3.1.4	Fabricación de Silicio de Grado Eléctrico .....	60
5.3.2	Producción de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos.....	61
5.3.3	Uso.....	62
5.3.4	Reciclaje.....	63
6.	DISCUSIÓN.....	65
7.	CONCLUSIÓN.....	81
8.	REFERENCIAS.....	82
9.	ANEXOS .....	85

# Índice de Figuras

Figura 1.1: Serie de tiempo de la energía solar fotovoltaica. ....	3
Figura 1.2: Escenario Stated Policies sobre las energías desde el año 2000 hasta el 2040. ....	4
Figura 1.3: Emisiones de CO <sub>2</sub> totales y centrales a carbón. ....	8
Figura 1.4: Emisiones de MP totales y centrales a carbón. ....	8
Figura 1.5: Emisiones de SO <sub>2</sub> totales y centrales a carbón. ....	9
Figura 1.6: Emisiones de NO <sub>x</sub> totales y centrales a carbón. ....	9
Figura 1.7: Matriz energética de Chile febrero 2021. ....	9
Figura 1.8: Esquema de composición de las partes de un panel solar. ....	11
Figura 1.9: Publicaciones en la literatura internacional relacionados con la huella del carbono. ....	17
Figura 1.10: Esquema fases del análisis ciclo vida. ....	18
Figura 4.1: Esquema de análisis de ciclo de vida de un producto. ....	22
Figura 4.2: Esquema general de fase 1 de ACV. ....	24
Figura 4.3: Esquema general de fase 2 de ACV. ....	26
Figura 4.4: Esquema general de fase 3 de ACV. ....	31
Figura 4.5: Esquema general de fase 4 de ACV. ....	32
Figura 5.1: Diagrama para la fabricación de vidrio templado. ....	40
Figura 5.2: Diagrama para la fabricación de marcos de aluminio. ....	43
Figura 5.3: Diagrama para la fabricación de Film EVA. ....	46
Figura 5.4: Diagrama para la fabricación de Silicio de grado eléctrico policristalino. ....	49
Figura 5.5: Diagrama para la fabricación de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos. ....	53
Figura 5.6: Diagrama para la fabricación de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos (Continuación). ....	53
Figura 5.7: Diagrama para el reciclaje térmico de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos. ....	56
Figura 6.1: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de vidrio. ....	65
Figura 6.2: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de marcos de aluminio. ....	67

Figura 6.3: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de film EVA. .	68
Figura 6.4: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de silicio de grado eléctrico policristalino. ....	70
Figura 6.5: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos. ....	71
Figura 6.6: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos. ....	73
Figura 6.7: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso del reciclaje térmico de paneles solares. ....	74

# Índice de Tablas

Tabla 1.1: Principales productores de energía solar a nivel internacional. ....	3
Tabla 1.2: Plantas Solares Fotovoltaicas de mayor capacidad mundialmente. ....	5
Tabla 1.3: Principales plantas fotovoltaicas en Chile para el año 2021. ....	10
Tabla 1.4: Principales materias primas en un panel solar. ....	11
Tabla 1.5: Etapas para la fabricación de módulos solares. ....	12
Tabla 1.6: Etapas para la fabricación EVA. ....	13
Tabla 1.7: Etapas para la fabricación de vidrio templado. ....	14
Tabla 1.8: Etapas para la fabricación de estructuras de aluminio ....	15
Tabla 4.1: Valores para evaluar la naturaleza del impacto. ....	28
Tabla 4.2: Valores para evaluar la intensidad del impacto. ....	28
Tabla 4.3: Valores para evaluar la extensión del impacto. ....	29
Tabla 4.4: Valores para evaluar el momento del impacto. ....	29
Tabla 4.5: Valores para evaluar la reversibilidad del impacto. ....	29
Tabla 4.6: Valores para evaluar la persistencia del impacto. ....	29
Tabla 4.7: Valores para evaluar la recuperabilidad del impacto. ....	30
Tabla 4.8: Valores para evaluar la acumulación del impacto. ....	30
Tabla 4.9: Valores para evaluar la sinergia del impacto. ....	30
Tabla 4.10: Valores para evaluar el efecto del impacto. ....	30
Tabla 4.11: Valores para evaluar la periodicidad del impacto. ....	31
Tabla 4.12: Jerarquización de impactos. ....	31
Tabla 5.1: Componentes de la unidad funcional. ....	34
Tabla 5.2: Entradas y salidas para la fabricación de vidrio ....	39
Tabla 5.3: Factores de emisión para la cuantificación relacionado a las entradas de materia en los procesos. ....	41

Tabla 5.4: Factores de emisión para la cuantificación relacionado a las entradas de energía en los procesos.....	41
Tabla 5.5: Estimación de emisiones totales en la fabricación de vidrio templado .....	41
Tabla 5.6: Entradas y salidas para la fabricación de marcos de aluminio .....	43
Tabla 5.7: Factores de emisión para la cuantificación relacionado a las entradas de materia en los procesos.....	44
Tabla 5.8: Factores de emisión para la cuantificación relacionado a las entradas de energía en los procesos... ..	44
Tabla 5.9: Estimación de emisiones totales en la fabricación de marcos de aluminio.....	44
Tabla 5.10: Entradas y salidas para la fabricación de film EVA.....	46
Tabla 5.11: Factores de emisión relacionadas con materia en la fabricación de film EVA.....	47
Tabla 5.12: Factores de emisión relacionadas con energía en la fabricación de film EVA. ....	47
Tabla 5.13: Estimación de emisiones totales en la fabricación de film EVA.....	47
Tabla 5.14: Entradas y salidas para la fabricación de film EVA.....	48
Tabla 5.15: Factores de emisión relacionadas con energía en la fabricación de silicio de grado eléctrico policristalino.....	49
Tabla 5.16: Estimación de emisiones totales en la fabricación de silicio de grado eléctrico policristalino.	50
Tabla 5.17: Flujos de entrada y salida para la producción de paneles solares fotovoltaicos policristalinos.....	52
Tabla 5.18: Factores de emisión relacionadas con energía en la fabricación de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos. ....	54
Tabla 5.19: Estimación de emisiones totales en la fabricación de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos. ....	54
Tabla 5.20: Factores de emisión relacionadas con energía en la mantención de los paneles solares fotovoltaicos policristalinos .....	55
Tabla 5.21: Estimación de emisiones relacionadas con energía en la mantención de los paneles solares fotovoltaicos policristalinos .....	55
Tabla 5.22: Identificación de los impactos ambientales para la fabricación de vidrio templado.....	58

Tabla 5.23: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la fabricación de vidrio templado. ....	58
Tabla 5.24: Identificación de los impactos ambientales para la fabricación de marcos de aluminio. ....	59
Tabla 5.25: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la fabricación de marcos de aluminio. ....	59
Tabla 5.26: Identificación de los impactos ambientales para la fabricación de film EVA. ....	60
Tabla 5.27: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la fabricación de film EVA. ....	60
Tabla 5.28: Identificación de los impactos ambientales para la fabricación de silicio de grado eléctrico. .	61
Tabla 5.29: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la fabricación de silicio de grado eléctrico. ....	61
Tabla 5.30: Identificación de los impactos ambientales para la fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos. ....	61
Tabla 5.31: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos. ....	62
Tabla 5.32: Identificación de los impactos ambientales para la etapa de uso de los paneles solares en específico la mantención de estos. ....	62
Tabla 5.33: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la etapa de uso específicamente en la mantención de paneles solares. ....	63
Tabla 5.34: Identificación de los impactos ambientales para la etapa de reciclaje térmico de paneles solares. ....	64
Tabla 5.35: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en el reciclaje térmico de paneles solares. ....	64
Tabla 6.1: Emisiones totales de ACV para los paneles solares fotovoltaicos policristalinos .....	75
Tabla 6.2: Tabla resumen de impactos ambientales identificados. ....	76

# 1. INTRODUCCIÓN

La energía solar tiene sus inicios en el año 1970, con la armada griega dirigiendo un rayo de luz solar hacia un barco de madera a una distancia de 50 metros con un escudo de bronce. Como se puede apreciar este tipo de energía no es algo nuevo, tiene precedentes desde muchos años atrás. Pero el principal uso con respecto a las celdas solares parte en el año 1839, con el físico Edmond Becquerel que descubrió el efecto fotovoltaico al estar experimentando con un prototipo de celda fabricada por electrodos metálicos en una solución conductora, observando que la celda lograba producir más electricidad cuando quedaba expuesta a la luz solar (Enercer, 2019).

Posterior a esto en el año 1873, el ingeniero eléctrico inglés Willoughby Smith descubrió la resistencia eléctrica del Selenio que era proporcional a la cantidad de luz que incide sobre él. De esta manera descubriendo un nuevo material fotoconductor y publicándolo en su artículo "Selenium: Its Electrical Qualities and The Effect of Light Thereon", en la Biblioteca del Royal College of Surgeons of England. Con las ideas de Becquerel y Smith, en 1876 aplican al Selenio como principio fotovoltaico, registrando que el Selenio podría generar electricidad al quedar expuesto a la luz. (Burns, 2011). Después de 50 años se retomaron las investigaciones sobre la energía solar fotovoltaica posterior a su descubrimiento, en 1883. El hito que marca un precedente de los paneles solares está relacionado con Charles Fritts, que crea la primera celda solar compuesta por Selenio funcional, conformando el recubrimiento de su celda con dicho material semiconductor y una delgada capa de oro, en donde las células tenían una eficiencia de conversión de un 1%. Si bien la conformación de este primer panel solar era bastante costosa por los materiales que requería, él fue considerado el padre de los paneles solares fotovoltaicos (López, 2014).

La atención por este tipo de energía no terminó ahí, logró llamar la atención de varios científicos reconocidos, uno de ellos fue Albert Einstein que, al ver el potencial de la energía solar en 1905, publicó un escrito sobre el efecto fotoeléctrico y como la luz es capaz de transportar energía, obteniendo como resultado abarcar la atención para la aceptación de la energía solar a una escala más amplia (Enercer, 2019).

Para los paneles solares fotovoltaicos que se ocupan hoy en día, el aporte inicial fueron los trabajos realizados por Laboratorios Bell en 1954. Tres de sus científicos, Bell, Daryl Chapin, Calvin Fuller, y Gerald Pearson, crearon una celda solar mucho más práctica que las elaboradas por Selenio ocupando el Silicio como principal material semiconductor. Al darse cuenta de la disponibilidad natural de éste y su mejor

eficiencia, vieron como una gran alternativa un avance hacia esta nueva conformación de los paneles solares fotovoltaicos. Fueron puestos a prueba en diferentes naves espaciales entre los fines del 1950 y durante el 1960. Como también el viaje del satélite Nimbus que dependía completamente de una serie de paneles solares fotovoltaicos de 470 vatios para su operación (Enercer, 2019).

Es así que potencias mundiales como EE. UU. al encontrarse en el año 1973 con una escasez de petróleo y la dependencia de dicha materia prima que existía, fue afectada económicamente, por lo que buscó innovación en materias de energía, aplicando la tecnología de los paneles solares fotovoltaicos en el techo de la Casa Blanca, para así generar energía y de esta manera marcar un precedente para la utilización de ERNC (Fedesarrollo, 2010). Con el paso de los años hasta hoy en día los avances producidos van por celdas solares adaptadas a ciertas condiciones climáticas, como avanzar en la eficiencia y disminuir el costo, se logra avanzar, pero lentamente. El silicio no deja de ser el material principal de la conformación de los paneles solares debido a su gran cantidad natural disponible (Enercer, 2019).

Si se establece una relación entre la materia prima con la que se elaboró las primeras celdas solares y el costo de dicho material. Con el pasar de los años éste fue disminuyendo su costo y logrando una mayor generación de energía, los primeros prototipos contenían oro como material semiconductor, siendo esta una de las razones por las cuales no existió una inversión prioritaria para un avance en energía solar, pero la materia prima de las celdas solares con el paso del tiempo se sometió a un cambio positivo, siendo el sílice como la materia prima más económica y efectiva en cuanto a generación de energía. Este cambio provocó un aumento en la investigación y protección de celdas solares de silicio viendo como gran beneficio un bajo costo y mayor eficiencia para la generación de energía (Burns, 2011). Es por esto que en el año 1833 la eficiencia era 1%, con un costo de alrededor de 300 \$USD por vatio, en comparación a 2 – 3 \$USD por vatio generado por electricidad a carbón, lo que justifica la utilización del carbón como materia prima para la obtención de electricidad. Posterior a esto Laboratorios Bell en 1954 obtuvo una eficiencia de 4% y más tarde alcanzó un 11% de eficiencia. En 1960 se logró un 14% de eficiencia por Hoffman Electronics bajando el costo a alrededor de unos 100 \$USD por vatio (López, 2014).

El Dr. Elliot Berman en el año 1970 elaboró la celda solar más económica hasta ese entonces con una eficiencia del 10% pero con un costo de 20 \$USD por vatio. De esta manera logró penetrar en la economía de la energía de una manera más competitiva. (Enercer, 2019)

A continuación, se presenta una línea de tiempo en la Figura 1.1 que resume los grandes hitos de la energía solar fotovoltaica.

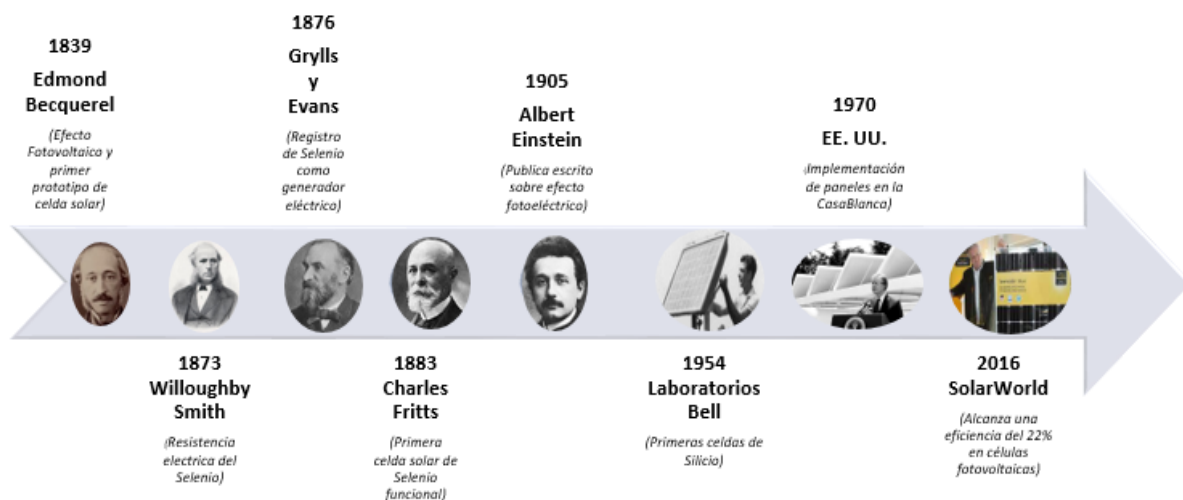


Figura 1.1: Línea de tiempo de la energía solar fotovoltaica. Fuente: Elaboración Propia

A nivel internacional la repercusión de la energía solar y el uso de paneles solares fotovoltaicos no ha sido en vano, según la Agencia Internacional de la Energía (IEA). Los principales productores de energía solar a nivel internacional se presentan en la Tabla 1.1 (Policies Stated, 2020).

Tabla 1.1: Principales productores de energía solar a nivel internacional.

País	Porcentaje Energía Solar Producida
Honduras	14,8%
Israel	8,7%
Alemania	8,6%
Chile	8,5%
Australia	8,1 %
Grecia	8,1 %

Fuente: Policies Stated, 2020.

El escenario previsto mundialmente con el crecimiento de la energía solar fotovoltaica es conducir a un futuro energético sostenible y seguro; Stated Policies expone que la demanda energética crece en razón de un 1% al año hasta el 2040, en donde la energía solar fotovoltaica cubrirá en ese escenario más de la mitad del crecimiento y las otras energías lo restante. La demanda de petróleo se nivelará en los años 30 del siglo XXI y el uso del carbón registrará mínimos. Y donde los países comprometidos a cero emisiones implementaran cambios en su matriz energética. Estos cambios previstos se evidencian en la Figura 1.2. (Policies Stated, 2020). Dichos Cambios de igual manera se logran ver en las plantas solares instaladas, en la Tabla 1.2 se presentan aquellas de mayor generación a nivel mundial.

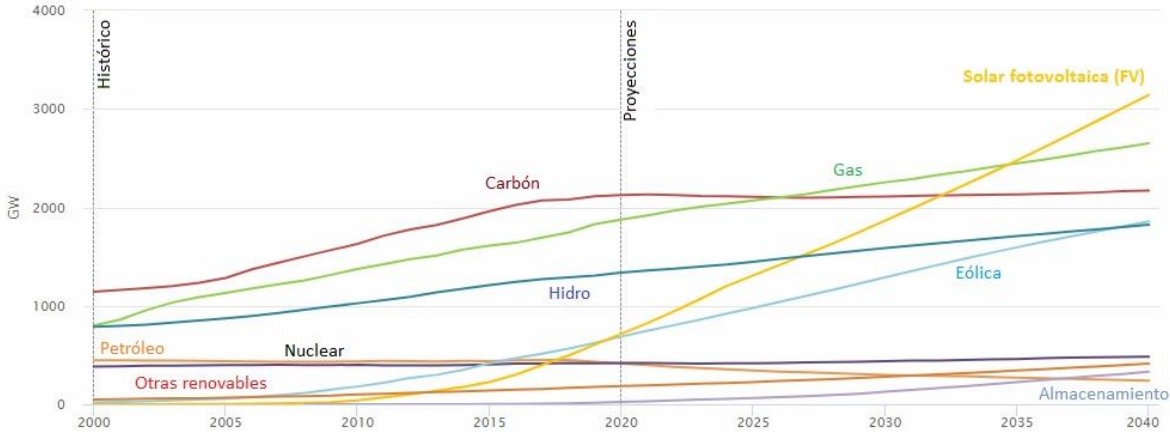


Figura 1.2: Escenario Stated Policies sobre las energías desde el año 2000 hasta el 2040.

Fuente: Policies Stated, 2020.

Por lo que India se emplaza como uno de los países con plantas solares de mayor capacidad para la generación de energía, Bhadla Solar Park, a cargo de compañías privadas de energía renovable tiene una capacidad de generación de 2.245 MW, este proyecto tiene como participes a diferentes compañías en su licitación, así de esta manera busca posicionarse con un nombre dentro del avance hacia energía solar (Policies Stated, 2020).

Tabla 1.2: Plantas Solares Fotovoltaicas de mayor capacidad mundialmente.

<b>Planta Solar Fotovoltaica</b>	<b>Capacidad</b>	<b>País</b>
Bhadla Solar Park	2.245 MW	India
Pavagada Solar Park	2.050 MW	India
Parque Solar del Desierto de Tengger.	1.500MW	China
Benban Solar Park	1.650 MW.	Egipto
Noor Abu Dhabi	1.177 MW	Emiratos Árabes Unidos
Kurnool Ultra Mega Solar Park	1.000 MW	India
Parque Solar Datong	1.000 MW	China
NP Kunta Ultra Mega Solar Park	900 MW.	India
Longyangxia Hydro- Solar PV Station	850 MW.	China
Parque Solar PV Villanueva	828 MW	México

Fuente: Elaboración Propia

En relación a lo anteriormente mencionado, la energía solar se planteó en Chile en el año 2012 cuando el gobierno de Chile inició una consulta pública para la elaboración de un marco teórico que regulase el uso y generación de energía eléctrica proveniente de energías renovables. A partir de lo anterior, se redactó la Ley 20.571 “Ley de generación ciudadana” que declara el derecho a todo ciudadano para autogenerar la energía eléctrica para su propio consumo y poder vender los excedentes producidos a empresas de suministro eléctrico. En el año 2015 se entregó la hoja de ruta por parte del Ministerio de Energía con respecto a la política energética del país, se proyectó que para el año 2050, el 70% de la energía nacional va a provenir de energías renovables, principalmente eólica, hidroeléctrica y solar, siendo esta última la que mejor futuro deja ver por las características del Norte de Chile. Fue así como en el año 2016, el proyecto Luz del Norte ubicado a 54 kilómetros de la ciudad de Copiapó elaboró un proyecto para generar 141 MW siendo la compañía First Solar la que llevó a cabo dicho proyecto, considerándose como el primer proyecto de generación de energía solar fotovoltaica en Chile de gran envergadura, logrando en el año 2016 su puesta en marcha. (Ministerio de Energía, 2012)

Hoy en día el mercado eléctrico en Chile cuenta con una capacidad instalada de 26.802 MW., en donde el 48,1% de ésta corresponde a fuentes no renovables alcanzando los porcentajes de 18,3% carbón, 11,7% derivados del petróleo y 18,1% gas natural. Por otro lado, un 51,9% corresponde a fuentes de energías renovables siendo un 14,9% de energía solar, ocupando el mayor porcentaje de las energías renovables (Generadoras de Chile, 2021). Esto permite proyectar un crecimiento progresivo de la energía solar en Chile, no sólo con la intención de generación de energía, sino también en reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, logrando así cumplir con los objetivos propuestos por el país.

Las energías renovables no convencionales en Chile van en un alza bastante significativa, reflejado en el aumento de la generación de energía de un 8,5% en el año 2020 con respecto al año 2019. Entrando así una motivación para consignar al país como un generador y exportador de energía solar. (Generadoras Chile, 2020). Dado que posee uno de los mayores niveles de radiación solar del mundo, así como también uno de los más altos precios de la energía en Latinoamérica, ofrece condiciones favorables para el desarrollo fotovoltaico (Valdés & Watts, 2012).

El futuro sobre la energía solar en Chile es próspero, se tiene previsto un aumento en cantidad de 2682 MW de energía generada para sumar en la matriz energética del país que provenga de proyectos que están en construcción, también proyectos que fueron ingresados al Sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA), que a fecha de hoy fueron aprobados en el SEN durante el mes de Abril de 2021 con una capacidad de 8.360 MW que de la misma manera que los proyectos anteriores sumarán de manera positiva a la matriz energética de Chile reemplazando principalmente a las energías con fuentes de carbón que paulatinamente van cerrando para llegar a la carbono neutralidad.

Dentro de las alternativas que se tienen para la generación de energías renovables que existen (eólica, geotérmica, biomasa, etc.) la que posee mayor fuerza para una proyección futura es la energía solar fotovoltaica. En donde a diciembre del 2019 se alcanzaron 2654 MW de instalaciones solares, logrando una penetración del 11% en el sistema de la energía solar instalada en Chile (Ministerio de Energía, 2019). Pero este incremento hacia las energías renovables no convencionales tales como la solar y su utilización de paneles solares no está exenta de impactos ambientales y contaminación. Esto juega un papel muy importante en cuanto a la generación de contaminantes atmosféricos que se producen desde la explotación de materia prima hasta las emisiones generadas por el traslado al destino indicado para cada panel solar.

El impacto ambiental para la generación de plantas fotovoltaicas solares, no solo se basa en la intervención de diferentes maquinarias para ocupar la superficie física de un sector que cumpla con las especificaciones para la buena generación de energía a través de paneles solares, sino que mucho antes, comienza en el proceso de la búsqueda de materias primas para la fabricación de los paneles solares fotovoltaicos. Esto permite plantear una mirada distinta al incremento de este tipo de energía en Chile, producto de que, si los niveles de contaminación producidos previamente por la fabricación de paneles solares son menores que los producidos por otros tipos de generación de energía, realmente sería un buen crecimiento. Pero

por el contrario se establecería una discordia en cuanto a un avance hacia energías más limpias en el caso de que éstas generen más contaminación o impactos ambientales que las energías convencionales.

Dentro de los contaminantes por generación de energía térmica a través del uso de carbón se tiene contaminantes atmosféricos tales como: material particulado (MP<sub>10</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y metales pesados (mercurio, vanadio y níquel), éstos afectan a la población, así como también a los ecosistemas locales. Se destacan también las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por los niveles altos que inciden fuertemente en el calentamiento global. De esta manera se deja en evidencia que los niveles de contaminación por energías que no son limpias y renovables constituyen el principal agente de contaminación atmosférica local y la mayor fuente de contaminación global (Chilesustentable, 2017).

Las plantas solares fotovoltaicas en Chile tienen su mayor concentración en el Norte del país debido al potencial que en este sector existe para la producción de energía, si bien el sistema se compone no solo de los paneles solares, sino que también de inversores, cableados, estructuras, etc. Este informe se enfocará en los paneles solares.

Esta apreciación de las energías renovables no convencionales son de gran importancia por las metas que Chile se propone en un futuro próximo a cumplir a cabalidad, permitiendo acertar en un avance que ya hoy en día se está produciendo a gran escala y confirmando las suposiciones realizadas a nivel nacional y mundial sobre la posición que puede tomar Chile con respecto a ser una de las potencias mundiales en ámbitos de energías limpias permitiendo dar un ejemplo concreto de cómo hay que avanzar con un sustento demostrado a través de análisis y conclusiones congruentes resolviendo cada duda que se pueda generar sobre estos nuevos avances.

## 1.1 Energías no renovables

Este tipo de energía constituye la mayor parte de generación hoy en día, la que no es bien vista en pro de un avance hacia energías limpias. Éstas producen niveles de emisión elevados, principalmente de CO<sub>2</sub>, MP, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, dejando ver que la dependencia de este tipo de producción de energía no se ajusta al futuro que establece el país en sus metas propuestas para la reducción de emisiones. Para este tipo de energía se muestra una comparación de las emisiones que producen las termoeléctricas a carbón actuales y las emisiones totales, donde el 91% de CO<sub>2</sub>, 88% de MP, 97% de SO<sub>2</sub> y 91% de NO<sub>x</sub> corresponden a este tipo de producción energía del total de emisiones producidos a la atmósfera (Chile Sustentable, 2017). Estos niveles de los contaminantes mencionados con una proyección al 2037 se pueden ver en Figuras 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6.

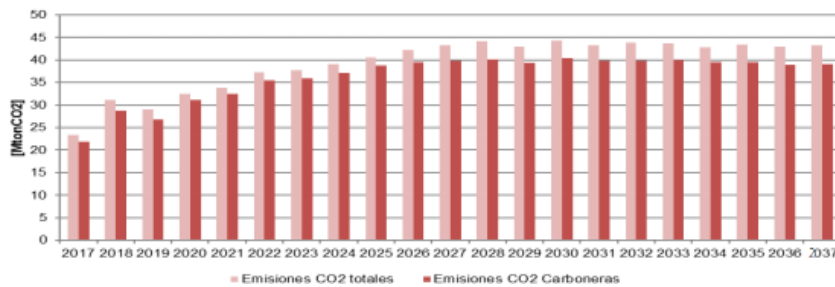


Figura 1.3: Emisiones de CO<sub>2</sub> totales y centrales a carbón. Fuente: Chile Sustentable, 2017

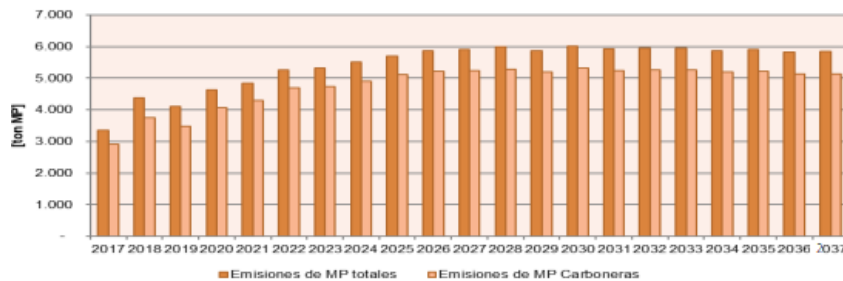


Figura 1.4: Emisiones de MP totales y centrales a carbón. Fuente: Chile Sustentable, 2017

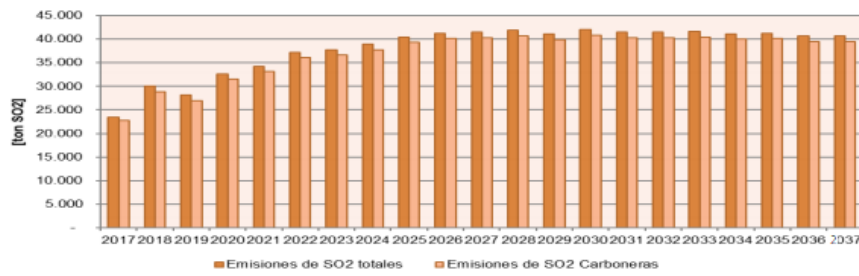


Figura 1.5: Emisiones de SO<sub>2</sub> totales y centrales a carbón. Fuente: Chile Sustentable, 2017

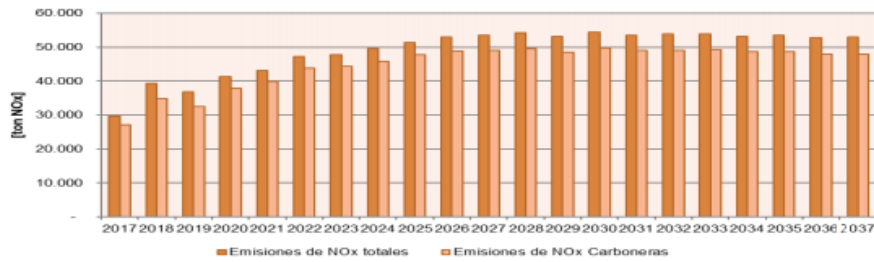


Figura 1.6: Emisiones de NO<sub>x</sub> totales y centrales a carbón. Fuente: Chile Sustentable, 2017

## 1.2 Energía Solar Fotovoltaica

En la actualidad Chile posee una matriz energética constituida por generación no renovable, tales como gas natural, derivados del petróleo y carbón que poseen un impacto ambiental alto y capaces de generar 8.700 toneladas de CO<sub>2</sub> al año (Lucas, 2018). Chile mediante la búsqueda de la disminución de los diferentes contaminantes provocados por estos tipos de energía se ha abierto a la implementación de energías no convencionales y renovables en especial con la energía solar fotovoltaica alcanzando en el año 2021 un 14,9% de la capacidad instalada como se puede ver en la Figura 1.7.

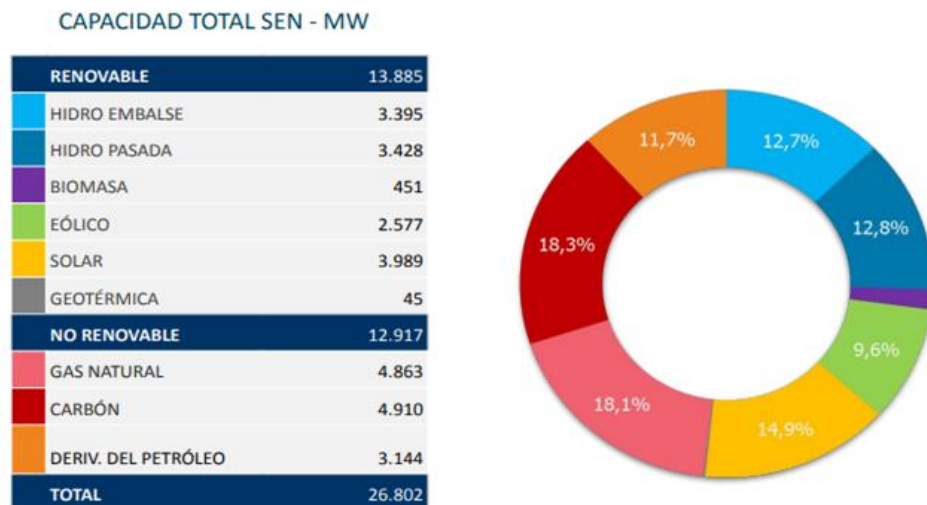


Figura 1.7: Matriz energética de Chile febrero 2021. Fuente: Comité Solar Chile, 2021

Este 10% de energía solar se distribuye principalmente en el norte del país en donde la Tabla 1.3 se encarga de mostrar las principales centrales fotovoltaicas y su capacidad de energía que proporcionan.

Tabla 1.3: Principales plantas fotovoltaicas en Chile para el año 2021.

<b>Nombre</b>	<b>Capacidad (MW)</b>
El Romeral	196
Romero	146,64
Luz del Norte	141
Finis Tarrae	138
Conejo Solar	104
Quilapilun	103,2
Amanecer CAP	101,02
El Pelicano	100,3
Carrera Pinto	73,5
Pampa Solar Norte	69,3

Fuente: Elaboración Propia

A partir de esta tabla es posible identificar la capacidad total para la generación total de energía de las principales plantas solares fotovoltaicas en Chile que asciende a más de 2.459 MW, lo que equivale alrededor de unas 225.000 toneladas de paneles solares instalados en Chile, según la equivalencia entre MW y toneladas de paneles solares (World Auto Steel, 2019). Para alcanzar esta cantidad de paneles solares debió existir un previo impacto y emisiones asociadas a su proceso de fabricación que no está cuantificado, logrando poner dudas sobre si el proceso previo es menos, igual o más contaminante que las energías no renovables. (Generadoras Chile, 2020).

Finalmente, la política nacional de energía pretende alcanzar el 70% de generación con energías renovables hacia 2050, una de las metas es que al año 2035, Chile se convierta en exportador de tecnología y servicios para la industria solar (Reyes, 2018).

Los paneles solares son el principal instrumento para la generación de energía solar, éstos principalmente y el tipo de paneles solares que se comercializa, son los compuestos por células de silicio. En la Figura 1.8 se puede observar el esquema de composición de un panel solar fotovoltaico.

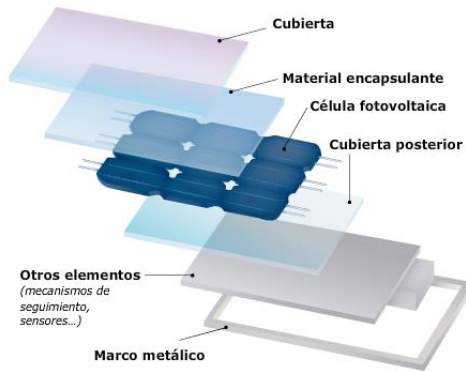


Figura 1.8: Esquema de composición de las partes de un panel solar

Para los paneles solares se tienen dos tipos, los policristalinos y monocristalinos. Aquellos llamados monocristalinos se obtienen mediante el proceso de Czochralski (Jeyraj *et al*, 2013). Las capas de Silicio monocristalino presentan una microestructura atómica extremadamente ordenada. La ventaja de los módulos de silicio monocristalino radica en poseer una eficiencia superior al 20%, siendo el tipo de celda con mayor eficiencia. Sin embargo, su buen funcionamiento se logra en zonas de radiación solar de baja intensidad (Energías Renovables, 2014). Por otro lado, tenemos los Policristalinos, este tipo de panel se caracteriza porque las celdas que lo conforman poseen una microestructura semi ordenada, alcanzando una eficiencia de un 15 % aproximadamente. La ventaja de estos módulos es su simplicidad de fabricación, por lo que su costo es inferior respecto a los paneles monocristalinos (Jeyraj *et al*, 2013). No obstante, estos paneles solares disminuyen considerablemente su eficiencia y su vida útil en zonas de alta radiación solar (TRITEC, 2017). Es importante destacar que en Chile predominan los módulos de silicio policristalino, con un 57,8% de utilización en plantas solares fotovoltaicas, superando significativamente a los paneles solares de silicio monocristalino (Castillejo *et al*, 2018). Para la fabricación de los paneles solares se tiene cuatro materias primas esenciales: silicio, vidrio, aluminio y polímeros (Etil Vinil Acetato). En la tabla 1.4 se pueden ver los porcentajes en los cuales éstos pueden ser encontrados en un panel solar.

Tabla 1.4: Principales materias primas en un panel solar.

Componente	Porcentaje
Vidrio	70%
Aluminio	18%
EVA	5.1%
Silicio	3.65%

Fuente: Weckend & Wade, 2016

### 1.3 Celdas solares de Silicio

Una celda solar es un dispositivo que representa la unidad fundamental de un sistema fotovoltaico. Estas celdas solares están principalmente compuestas por sílice que es el material semiconductor, capaz de transformar la radiación solar en energía eléctrica, pero este material no puede ser utilizado sin antes pasar por procesos previos para obtener sílice en forma cristalina y sin imperfecciones (Morales & Palacios, 2017). El proceso de obtención finalmente se puede resumir en la Tabla 1.5 (Bouzguenda *et al*, 2012). De esta manera se logra la obtención de los módulos solares para el ensamblaje con las otras estructuras y materiales que los componen formando de esta manera los paneles solares.

Tabla 1.5: Etapas para la fabricación de módulos solares.

Etapa	Descripción
Producción del silicio metalúrgico	Proceso realizado en un horno de arco eléctrico, en el cual se obtiene como producto silicio metálico por medio de la reacción del cuarzo a alta temperatura y reduciendo algunos materiales como el carbón, como subproducto se puede obtener humo de sílice condensado y calor residual.
Fundición silicio metalúrgico	Proceso que se realiza en hornos de altas temperaturas, donde se ingresa silicio de grado solar en un 80,14%, 14,61% de silicio de grado solar y 5,25% silicio de grado eléctrico.
Producción de obleas	Se comienza el corte de lingotes de silicio por sierras de cinta o sierra de alambre en columnas, luego se coloca en una sierra de varios hilos que finalmente forma las obleas. Estas se limpian utilizando diferentes productos químicos como KOH o NaOH, etc.
Producción de células solares	Esta etapa sigue luego del tratamiento químico para la eliminación de impurezas e imperfecciones, pasan a un proceso de dopaje con el fin de poder crear la unión P-N. Una vez finalizado este proceso se realiza una metalización en la parte delantera y trasera con el fin de permitir la conexión eléctrica y finalmente el posterior revestimiento antirreflectante para la mejora de eficiencia.

Fuente: Guzmán, 2017

## 1.4 EVA (Etil Vinil Acetato)

Es un materia que puede ser utilizado como aislante y revestimiento exterior; al exponerse en zonas de radiación soporta temperaturas de hasta 110°C. Para los recubrimientos de cables eléctricos el porcentaje en peso de acetato de vinilo varía entre 18 a 28%, siendo el resto de etileno (Barlow, 1991). Se trata de un polímero transparente que se aproxima a los materiales elastómericos en suavidad y flexibilidad, sin embargo, puede ser procesado al igual que otros termoplásticos. El material tiene buena transparencia y brillo, propiedades de barrera, de baja temperatura dureza, resistencia al stress-crack, es termo adhesivo y con propiedades adhesivas a prueba de agua, posee buena resistencia a la radiación UV (Gálvez, 2009). Las etapas para la fabricación de EVA se describen en la Tabla 1.6. Luego de este proceso, el EVA está listo para ser utilizado en la conformación para los paneles solares.

Tabla 1.6: Etapas para la fabricación EVA.

Etapa	Descripción
Compresor Primario	En esta etapa se ingresan monómeros a un compresor que lleva la presión hasta 20-30 MPa. De esta manera formar copolímeros de etileno.
Compresor de alta presión	Proceso donde se toman los copolímeros producidos en el compresor primario obteniendo un copolímero que contiene de 30 a 80% en peso de acetato de vinilo copolimerizado mediante polimerización en masa de los monómeros por el método de alta presión a presiones de 500 a 5.000 bar y preferiblemente a presiones de 100 a 300 MPa. Obteniendo como resultado final un copolímero de etileno de mejor calidad.
Separación	El copolímero obtenido entra a un reactor, con una zona de baja presión de 1 MPa. Introduciendo comonómeros de VA y peróxido que sirve para la esterilización y que aporta una mayor rigidez. El producto que se obtiene es el EVA, que se enfría
Extrusor	Finalmente entra a la etapa del extrusor donde se le da el molde deseado al EVA, quitando imperfecciones y partes de granulados pegajosos.

Fuente: Camacho, 2017

## 1.5 Vidrio templado

El vidrio templado juega un rol muy importante en la estructura del panel solar, ya que éste les entrega protección a las células fotovoltaicas y también son de buena ayuda para la transmisión de la radiación solar. Por lo general, este vidrio templado tiene un bajo contenido de hierro. La obtención de este material se describe en las etapas de la Tabla 1.7.

Tabla 1.7: Etapas para la fabricación de vidrio templado.

<b>Etapas</b>	<b>Descripción</b>
Fundición	En esta etapa se ingresan las materias primas (arena, carbonato, caliza, vidrio reciclado) a un horno de fundición con una temperatura idealmente de 1500°C, obteniendo gotas de vidrio.
Formado	Este proceso para la obtención de un vidrio plano consiste en introducir las gotas de vidrio a un proceso de flotación donde se alcanza una temperatura de 1000°C para que el vidrio fundido quede sin irregularidades y su superficie logre ser plana. Al pasar un periodo de tiempo la lámina de vidrio que se obtiene se enfría y se pasa a un horno de túnel de recocido. Obteniendo la lámina de vidrio
Recocido	La lamina de vidrio vuelve a pasar por un proceso de recocido para liberar tensiones internas que se producen debido al rápido e irregular enfriamiento. La lamina se vuelve a calentar y se enfría lentamente, esto se lleva a cabo en un horno de túnel.
Templado	Finalmente pasa por un proceso térmico donde se logra obtener un vidrio templado, este proceso se realiza para obtener un vidrio de mayor fortaleza y calidad.

Fuente: Asociación Chilena de Seguridad, 2000

## 1.6 Marcos y soportes de Aluminio

Las estructuras de aluminio le dan robustez mecánica al conjunto. Estas estructuras de un panel solar permiten su inserción en estructuras que se agruparán a módulos, además le brindan protección y estabilidad al panel solar. El aluminio permite condiciones favorables frente a las condiciones climáticas que se puedan ver enfrentados los paneles solares. En la Tabla 1.8 se detalla el procedimiento para la obtención de las estructuras de aluminio.

Tabla 1.8: Etapas para la fabricación de estructuras de aluminio

Etapa	Descripción
Proceso Bayer	En esta etapa se procede a triturar la bauxita hasta obtener un polvo fino, que es mezclado con sosa cáustica líquida y calentado a alta presión. La sosa disuelve los compuestos del aluminio que, al encontrarse en un medio fuertemente básico, se hidratan, obteniendo. Finalmente, se calcina el hidróxido de aluminio a temperaturas cercanas a 1000 °C, de esta manera se obtiene óxido de aluminio.
Electrólisis	Se mezcla óxido de aluminio con criolita, que actúa de fundente, con lo cual la temperatura de fusión de esta mezcla se rebaja hasta 900 °C. A continuación, se somete al proceso de electrólisis, sumergiendo en la cuba unos electrodos de carbono. Se obtiene aluminio que tiene una pureza del 99,5% al 99,9%.
Purificación	De las cubas pasa al horno, donde es purificado mediante la adición de un fundente o se alea con otros metales, con objeto de obtener materiales con propiedades específicas. Después se vierte en moldes o se hacen lingotes o chapas.
Extrusión	Finalmente pasa por un extrusor, en donde se le confiere la forma que se necesite y que se adapte a las necesidades de los paneles solares.

Fuente: MITECO, 2020

## 1.7 Huella de carbono

La huella de carbono definida en forma muy general es la representación de la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) que se emiten a la atmósfera y que son derivados de actividades de producción o consumo de bienes y servicios (Wiedmann, 2009). Esta herramienta es considerada una de las más importantes en lo que respecta a la cuantificación de dichos gases. En los últimos años se han desarrollado bastantes herramientas y metodologías que permiten la cuantificación de los GEI de organizaciones, unidades, así como también de unidades individuales lo que ha llevado a que la huella de carbono se convierta en un tema de debate sobre el cambio climático. De esta manera se llama la atención de diferentes sitios de interés como consumidores, negocios, gobiernos, ONG y organizaciones internacionales (Hertwich & Peters, 2009). A medida que este interés por diferentes áreas comienza a aumentar, se logran inducir en cambios para patrones competitivos de las empresas, aunque en el presente se sigue identificando una ausencia de la implementación de metodologías en muchos tipos de organizaciones. En el caso de los países en vías de desarrollo, como son la mayoría de los casos de los países de Latinoamérica, el avance hacia un desarrollo sostenible y un menor desarrollo menos vulnerable contra el medio ambiente considera la reducción de emisiones para los sectores productivos y poder realizar avances inmediatos en la cuantificación de dichas emisiones y de disminución de los efectos climáticos, con el fin de resguardar su actual posición competitiva. Un número creciente de grupos sociales, empresariales y políticos de los más diversos países como también una importante parte de la comunidad científica tienen el convencimiento que el cambio climático es originado por las actividades humanas constituyendo por lo tanto un desafío ambiental a gran escala que se puede interpretar como uno de los caminos hacia el desarrollo sustentable en el siglo presente (Samaniego & Schneider, 2009).

De igual manera, es ampliamente aceptado que la causa de dicho fenómeno se encontraría en las altas concentraciones atmosféricas de los llamados GEI, las cuales serán responsables de aumentar la temperatura global del planeta. Pero a pesar de la importancia actual mencionada y los beneficios como también objetivos que pueden traer consigo el cálculo de la huella de carbono, este concepto no ha sido incorporado de la mejor manera en cursos relacionados con el medioambiente o en planes de gestión donde es necesaria su aplicación, fallando en la cuantificación de este concepto. Existen iniciativas de países desarrollados en los que el concepto se implementa desde las escuelas y existen un gran número de personas dedicadas a la investigación de esta herramienta. La investigación académica ha tenido un notable desarrollo, desde publicaciones del concepto hasta incluso estudios cuantitativos del uso de la herramienta, en la Figura 1.9 se aprecia el incremento detallado en los últimos años.

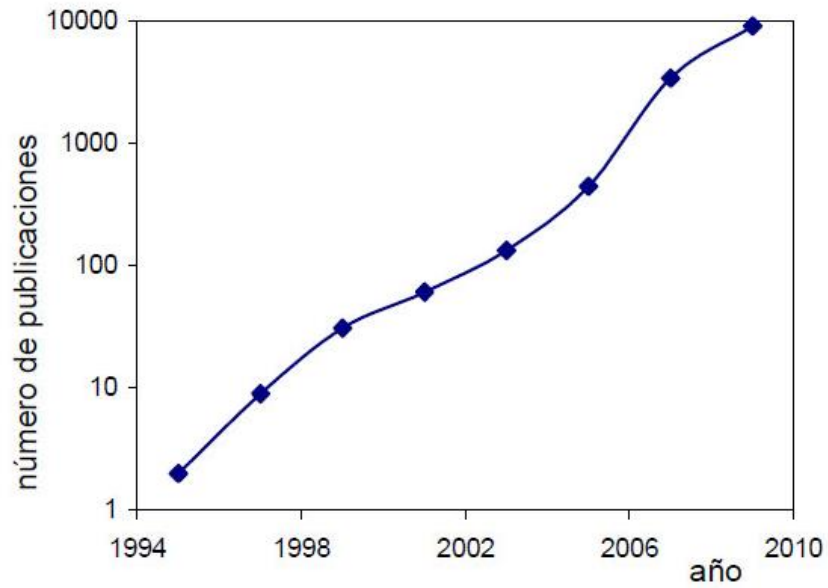


Figura 1.9: Publicaciones en la literatura internacional relacionados con la huella del carbono.

Fuente: Espíndola & Valderrama, 2011.

A pesar de este avance en literatura relacionada con la huella de carbono, la cantidad de áreas en las que se puede aplicar este concepto da un precedente de aplicación necesaria para conformar un compromiso ambiental con respecto a los productos o servicios que se ofrecen, comprendiendo las bases mínimas que conlleva la huella de carbono para así aplicarse en un ámbito profesional.

## 1.8 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es una metodología de estudio que permite evaluar los impactos ambientales asociadas a un producto o servicio mediante la cuantificación de los flujos de materia y energía en los distintos procesos que constituyen la vida útil del activo (Romero, 2019). Este tipo de metodología es muy flexible, puede abarcar y ser implementada para cualquier tipo de industria o sistema, desde procesos simples hasta otros más complejos. La norma internacional ISO 14040 define al ACV como una técnica para determinar aspectos e impactos ambientales asociados a un producto, compilando un inventario tanto en las entradas y salidas que son relevantes para el sistema. Interpreta los resultados de las fases de dichos inventarios e impactos en base a los objetivos del estudio (ISO, 2006). El ACV tiene cuatro fases que son: Definición de Objetivo y Alcance, Análisis de Inventario de Ciclo de Vida, Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida e Interpretación de Ciclo de Vida que está regido por la serie de normas internacionales ISO 14040 (Duque & Ramírez, 2006). En la Figura 1.10 se puede ver las fases del análisis de ciclo de vida, estas fases no son independientes y secuenciales entre sí, sino que son mutuamente modificadas a lo largo de las iteraciones hasta llegar a un modelo fidedigno.

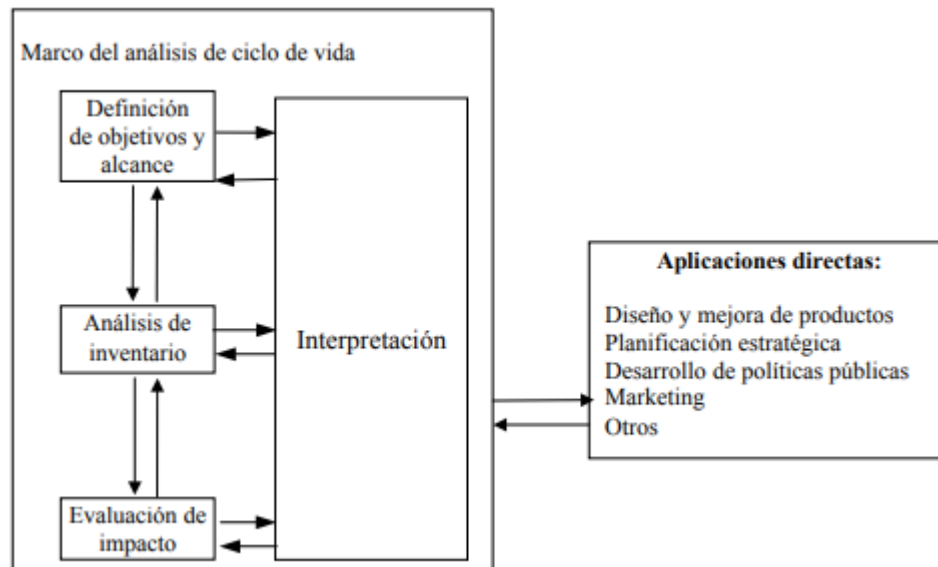


Figura 1.10: Esquema fases del análisis ciclo vida. Fuente: ISO, 2006

El alcance de un ACV, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y del uso previsto del estudio. La profundidad y amplitud del ACV puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de un ACV en particular. La fase de análisis del inventario del ciclo de vida (fase ICV) es la segunda fase del ACV. Es un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido.

La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (fase EICV) es la tercera fase del ACV. El objetivo de la EICV es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV) de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental. La interpretación del ciclo de vida es la fase final del procedimiento de ACV, en la cual se resumen y discuten los resultados del ICV o del EICV o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos (ISO, 2006). Al conocer la metodología del análisis de ciclo de vida, se procede a la recopilación de datos e información necesaria, para que se pueda emplear dentro de las etapas definidas y obtener resultados que permitan una futura toma de decisiones.

El ACV puede ayudar a:

- La identificación de oportunidades para la mejora del desempeño ambiental en las distintas etapas del ciclo de vida.
- El aporte de información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales como por ejemplo en el diseño o rediseño de productos o procesos, planificación estratégica, establecimiento de prioridades, entre otros.
- La selección de indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo técnicas de medición
- Marketing en acciones como la implementación de etiquetas ambientales, la elaboración de reivindicaciones ambientales o de una declaración ambiental del producto.

## 2. PROBLEMA

La energía solar en Chile crece año tras año, por lo que según la política energética el objetivo es, crecer al año 2050 en un 70%, es decir que la energía que se consume en el país provenga de fuentes tales como la fotovoltaica, que a la vez logrará paralelamente cumplir con los objetivos del Plan de Descarbonización. Este incremento a nivel nacional requerirá de la implementación de una elevada cantidad de paneles solares fotovoltaicos del tipo policristalinos, debido a las características de eficiencia que entregan éstos con respecto a la geografía del país a los áreas en donde existe un mayor potencial para implementar este tipo de energía. Así de esta manera se necesitará materia prima para la producción de éstos, la ocupación de transporte para el traslado, maquinarias para la implementación y también un sistema de mantenimiento y reciclaje de éstos.

Además, hay deficiencias en las etapas de la implementación de éstos en el país, por lo tanto, existe una falta en la cuantificación de huella de carbono de los paneles solares fotovoltaicos desde la obtención de materias primas hasta el proceso en desuso de éstos.

Por lo que es primordial la utilización de herramientas de gestión ambiental que permitan cuantificaciones y una comparación formal con respecto de la huella de carbono de las energías convencionales existentes en Chile al día de hoy. En busca de una identificación de mejoras para diferentes procesos antes, durante y después de su implementación de plantas solares fotovoltaicas, que puedan permitir una mayor eficiencia sobre los avances en materia de energía responsablemente.

Es en este contexto es que el presente proyecto de título busca implementar la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), para la cuantificación de la huella de carbono de los paneles solares fotovoltaicos policristalinos y a la vez diferentes análisis medioambientales que esta herramienta permite identificar. Esto permitirá aplicar un enfoque comparativo con respecto a las energías convencionales hoy en día establecidas como también concluir e interpretar en qué etapas debe existir una revisión para una mejor huella de carbono.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo General**

- Cuantificar la Huella de Carbono con la metodología de Análisis de Ciclo de Vida para los Paneles Solares Fotovoltaicos, evaluando su impacto medioambiental en la matriz Energética de Chile.

### **3.2 Objetivos Específicos**

- Definir el límite y detalle del sistema para el estudio del análisis de ciclo de vida sobre paneles solares fotovoltaicos policristalinos.
- Realizar un análisis de ciclo de vida, como una herramienta de gestión para analizar los impactos medioambientales producidos por la implementación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos en Chile.
- Interpretar los resultados obtenidos en el ACV para proponer una disminución sobre pasivos ambientales.

## 4. METODOLOGÍA

La importancia con respecto a la protección ambiental y los posibles impactos asociados a procesos, productos y servicios, tanto manufacturados como consumidos han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para lograr comprender de mejor manera y de esta forma tratar los impactos que se pueden ocasionar. Una de las metodologías e instrumentos de gestión en este sentido es el Análisis de ciclo de vida. Para la realización de un ACV, la norma ISO 14044 detalla los requisitos para llevar a cabo esta metodología. El ACV trata los aspectos e impactos ambientales de las emisiones y vertidos a lo largo de los procesos “desde la cuna hasta la tumba” de un producto, tales como la obtención de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado y disposición final. La Figura 4.1 muestra el esquema de ciclo de vida de manera general que permite apreciar los procesos que toma en cuenta e identificar las principales salidas y entradas al sistema (ISO, 2006).

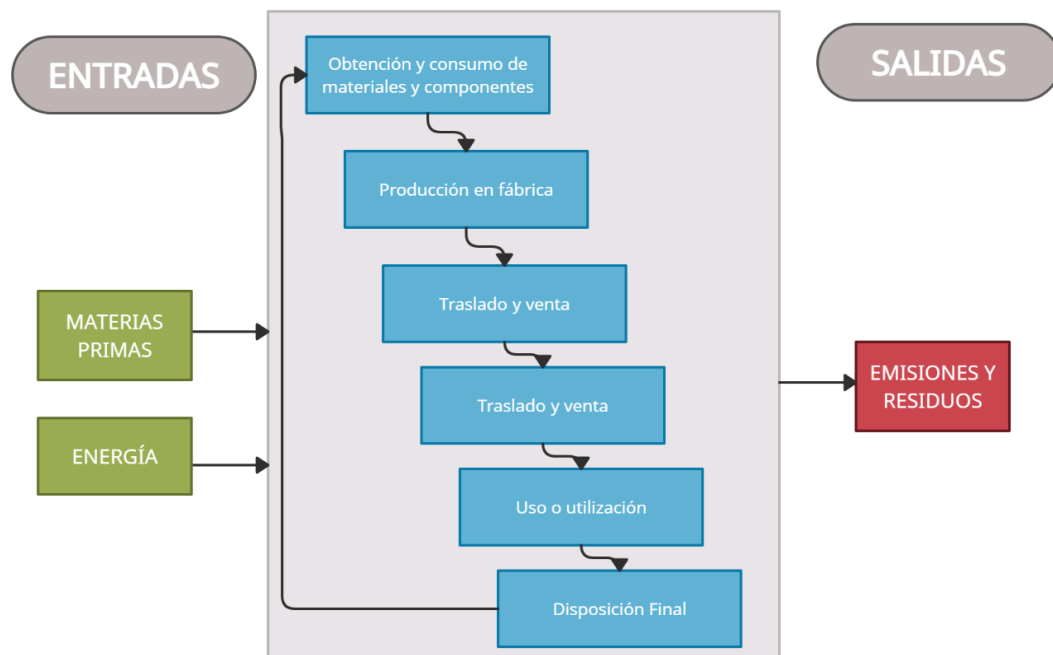


Figura 4.1: Esquema de análisis de ciclo de vida de un producto. Fuente: Elaboración propia

La metodología se representará en 3 partes, definidas por los objetivos que se expusieron anteriormente.

Para esto hay cuatro etapas identificadas en un análisis de ACV, etapa 1: objetivo y alcance, etapa 2: análisis de inventario, etapa 3: evaluación del impacto ambiental y etapa 4: fase de interpretación.

## 4.1 Fase de definición del objetivo y el alcance

Los objetivos y el alcance de un ACV con los límites del sistema y el nivel de detalle, dependiendo del tema y uso previsto del estudio. La profundidad y amplitud de éste pueden diferir considerablemente, dependiendo del objetivo de un ACV en particular. Esta etapa partió con un revisión bibliográfica que permitió identificar las materias primas necesarias para la fabricación de los paneles solares, compilando datos sobre los porcentajes que forman parte del panel solar de cada materia prima, como técnicas para conseguir dichas materias primas y tener una idea de los procesos que se llevan a cabo para la posterior cuantificación de salidas y entradas al sistema. Una vez finalizada la revisión bibliográfica, se consolida la información sobre la fabricación de paneles solares y ocupando esta información para la aplicación de ACV, con el fin de obtener antecedentes medioambientales y proceder a las comparaciones planteadas.

Los pasos a seguir en esta fase fueron:

- Definir Objetivos de ACV: Se definió el objetivo para permitir detallar de mejor manera el uso de ACV dentro de la problemática planteada, que logró cumplirse con la etapa final de Interpretación. Detallando la aplicación prevista, razones para la realización del estudio y la comparación que se plantea con los resultados obtenidos.
- Función del sistema: Detallar la aplicación de los paneles solares fotovoltaicos policristalinos, para comprender las etapas que se tomaron en cuenta en las siguientes fases de ACV.
- Unidad funcional: Corresponde al objeto o servicio al cual se le aplicó el ACV, de esta manera se obtuvo la base de cálculo para la posterior cuantificación de los datos. Se justificó la utilización de paneles solares policristalinos por sobre otros tipos de tecnologías de paneles solares.
- Límites del sistema: Éstos jugaron el rol más importante dentro de esta etapa ya que corresponde al punto en el cual se partió y finalizó el análisis de ciclo de vida del activo. De esta manera se pudo excluir etapas en el ACV.
- Requisitos de calidad de datos: Tener datos que sean de calidad, permitió obtener resultados fidedignos. Por eso se definieron ciertos requisitos para la procedencia y obtención de los datos, que permitieron dar una credibilidad mayor para su posterior uso.

De esta manera se logró definir tanto el objetivo como el alcance que se tuvo en el ACV sobre los paneles solares fotovoltaicos policristalinos y cumplir con el primer objetivo específico propuesto. Cada uno de estos pasos son iterativos y pueden verse representados gráficamente en la figura 4.2.

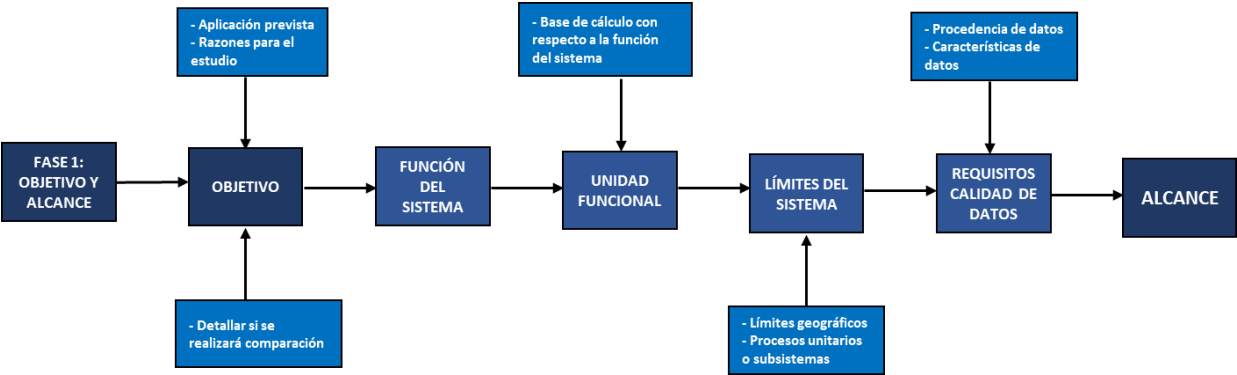


Figura 4.2: Esquema general de fase 1 de ACV. Fuente: Elaboración Propia

## 4.2 Fase de análisis de inventario

El análisis de inventario de ACV (Fase ICV) es un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir el objetivo del estudio definido. Este análisis de inventario comienza en la revisión bibliográfica, donde ya existe una recopilación de datos para la posterior cuantificación, poder saber las emisiones que son finalmente las salidas como también las materias primas a utilizar para la obtención de diferentes productos que marcan las entradas al sistema. La cuantificación que se realizó de las emisiones de los diferentes procesos que se definen en los límites marcando una gran importancia por las emisiones generadas de CO<sub>2</sub>, que permitió ver de qué manera se ve afectada este tipo de emisión, que es la más representativa para poder realizar comparaciones posteriores y que van en congruencia con la situación actual del país y los objetivos que este plantea a futuro. Es un proceso iterativo, para adquirir nuevos datos y el mayor conocimiento que se pueda ir obteniendo durante el desarrollo del documento, hace redefinir con mayor precisión las fases del ciclo o los flujos materiales y energéticos.

Para realizar esta fase se incluyeron las siguientes etapas:

- Recolección de los datos
- Construcción del diagrama de flujo para entradas y salidas
- Marcar los límites del sistema
- Cálculos de balances de materia y energía
- Redefinición de los objetivos y alcances

Una vez elaborado el diagrama de flujo general del ACV, se separa en subsistemas y estos a su vez en procesos unitarios, facilitando los cálculos de balance. Éstos se ordenan en forma sistemática, identificando las entradas y salidas como también destinos y orígenes. La definición de unidades de medidas es un factor a considerar también en los diagramas.

Para la cuantificación de emisiones se ocupó la siguiente fórmula.

$$(\text{Emisión (Contaminante)}) = N.A. \times F.E. \times \left(1 - \frac{E.A.}{100}\right)$$

Donde: N.A. = Nivel de actividad, F.E.= Factor de emisión y E.A.= Eficiencia de Abatimiento. Metodología ocupada por la AP42 y IPCC.

A pesar de que los límites del sistema se conforman en la fase 1 del ACV, es esencial precisar en la fase de inventario para eliminar incertidumbres. En el caso de sistemas que puedan desarrollar más de una función o producto, se debió distinguir los aspectos ambientales que estos generaban y relacionarlos por producto o función de tal manera que cada uno esté dentro de los límites del sistema. Se identificaron las cargas ambientales en los siguientes casos:

- **Procesos de salidas múltiples**, donde se generan diferentes productos de los cuales pueden quedar fuera del sistema
- **Procesos con entradas múltiples**, donde existe dificultad para aclarar la relación de entradas y emisiones
- **Procesos de reciclaje de lazo abierto**, donde los residuos que salen de un sistema pueden ser utilizados como materias primas de otro sistema.

Esta etapa se ve representada por el esquema general representado en la Figura 4.3.

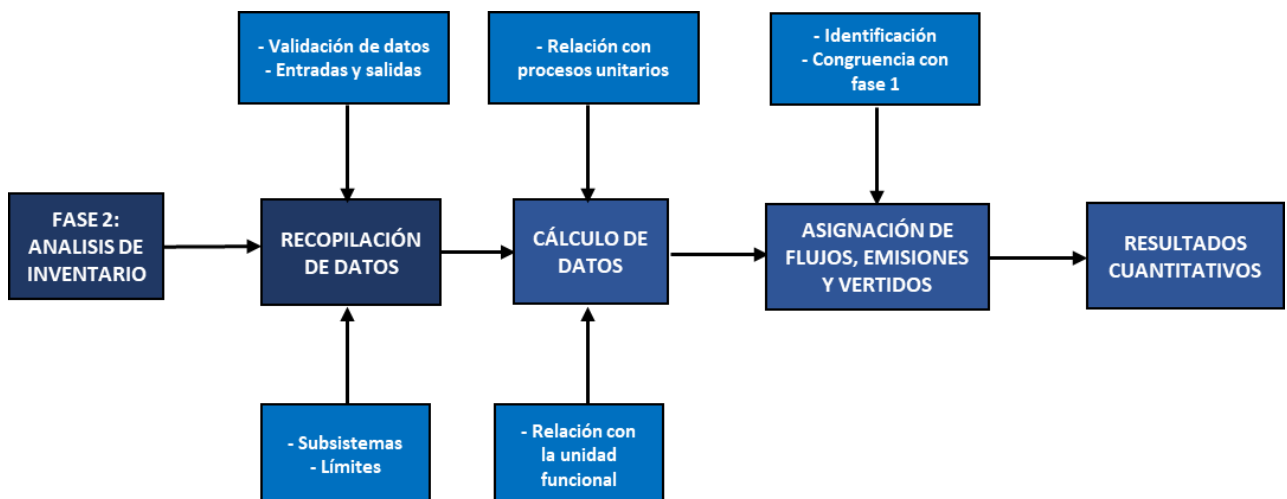


Figura 4.3: Esquema general de fase 2 de ACV. Fuente: Elaboración Propia

## 4.3 Fase de evaluación del impacto ambiental

La evaluación del impacto ambiental (Fase EICV), tiene como objetivo proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental. Ésta supone la asociación del inventario con impactos ambientales de acuerdo con el objetivo y alcance.

Esta evaluación debe incluir:

- I. Clasificación: Describe los efectos potenciales de las entradas y salidas del sistema cualitativamente, éstos se asignan a categorías de impactos basadas en el tipo de impacto esperado sobre el ambiente.

Esta asignación ha de fundamentarse en el análisis de los procesos medioambientales relevantes y debe permitir responder la pregunta. ¿Cuáles son los impactos medioambientales esperados de cada entrada y salida del sistema? Como propósito principal tiene describir los efectos ambientales potenciales de las entradas y salidas, decidiendo qué impactos se consideran en la evaluación. Para esta clasificación existen tres grandes categorías de impactos:

- a. Recursos Naturales
- b. Salud Humana
- c. Salud Ecológica

- II. Caracterización: Paso cuantitativo en el que se evalúa la contribución relativa de cada entrada y salida en su categoría de impacto asignado y se totalizan las contribuciones dentro de cada categoría.

Se tiene que fundamentar con el análisis de los procesos medioambientales relevantes y que permite responder a las preguntas: ¿Cuál es la contribución potencial de una entrada o salida específica a diferentes impactos medioambientales? Y ¿Cuál es la contribución potencial total del sistema a diferentes impactos ambientales?

III. Valoración: Es un paso, que puede ser cualitativo o cuantitativo en el que se pondera la importancia relativa de diferentes impactos medioambientales. La valoración puede no estar necesariamente fundamentada en un análisis científico, se pueden incluir valores de tipo ético, socioeconómico, etc. Es una herramienta formal que transforma el perfil medioambiental en un índice medioambiental, para esto se aplicará una matriz de impactos ambientales que permitirá tener la inclusión de la clasificación, a través de la relación de las entradas y salidas con sus relativos impactos ambientales; la caracterización con la valoración de cada criterio de evaluación y la valoración relacionada con la significancia de cada impacto. Cada criterio se evalúa bajo la siguiente ecuación de importancia.

$$\text{Importancia} = (3I + 2Ex + Mo + Pe + Rv + Si + Ac + Ef + Pr + Mc)$$

Dónde: Na: Naturaleza del Impacto; I: Intensidad; Ex: Extensión; Mo: Momento; Rv: Reversibilidad; Pe: Persistencia; Mc: Recuperabilidad; Ac: Acumulación; Si: Sinergia; Ef: Efecto; Pr: Probabilidad. Con esto se logrará identificar la significancia de cada impacto. Los criterios de evaluación de impactos ambientales son los siguientes:

- Naturaleza (Na): Hace referencia a su carácter beneficioso (+) o perjudicial (-) respecto al estado previo, como se observa en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Valores para evaluar la naturaleza del impacto.

Criterio	Valor
Positivo	+1
Negativo	-1

- Intensidad (I): Se refiere al grado de incidencia sobre el medio, en el ámbito específico en que actúa, como se observa en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Valores para evaluar la intensidad del impacto.

Criterio	Valor
Baja	1
Media	2
Alta	4
Muy Alta	8
Total	12

- Extensión (Ex): Se refiere al área de influencia teórica del impacto en relación con el entorno del proyecto considerado, como se observa en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Valores para evaluar la extensión del impacto.

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Baja	1
Media	2
Alta	4
Total	8

- **Momento (Mo):** Alude al tiempo que transcurre entre la realización de la acción y la aparición del efecto, como se observa en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Valores para evaluar el momento del impacto.

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Largo Plazo	1
Medio Plazo	2
Corto Plazo	3
Inmediato	4

- **Reversibilidad (Rv):** Se refiere a la posibilidad de reconstruir las condiciones iniciales una vez producido el efecto, como se observa en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Valores para evaluar la reversibilidad del impacto.

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Inmediato	1
Corto Plazo	2
Medio Plazo	3
Largo Plazo	4
Irreversible	8

- **Persistencia (Pe):** La persistencia del impacto está ligada con el tiempo que supuestamente permanecería el efecto, a partir del inicio de la acción, como se observa en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Valores para evaluar la persistencia del impacto.

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Fugaz	1
Momentáneo	2
Temporal	3
Persistente	4
Permanente	5

- Recuperabilidad (Mc): Se refiere a la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales, por medio de la intervención humana, es decir mediante la aplicación de medidas correctoras o restauradoras, como se observa en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Valores para evaluar la recuperabilidad del impacto.

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Inmediata	1
Corto Plazo	2
Medio Plazo	3
Largo Plazo	4
Irrecuperable	8

- Acumulación (Ac) La acumulación implica el incremento progresivo en que se manifiesta el efecto, cuando la acción que lo genera persiste de forma continua o reiterada, como se observa en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Valores para evaluar la acumulación del impacto.

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Simple	1
Acumulativo	4

- Sinergia (Si): Se define como la acción de dos causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales. La acción puede ser no sinérgica, de sinergismo moderado o altamente sinérgica, como se observa en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Valores para evaluar la sinergia del impacto.

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Sin Sinergismo	1
Sinergismo Moderado	2
Sinergismo Elevado	4

- Efecto (Ef): Muestra la relación entre la causa del impacto y su manifestación sobre el medio, como se observa en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Valores para evaluar el efecto del impacto

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Indirecto	1
Directo	4

- Periodicidad (Pr) Se refiere a la regularidad de manifestación del efecto, bien sea de manera cíclica o recurrente (periódico), de forma impredecible en el tiempo (efecto irregular), o constante en el tiempo (continuo), como se observa en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Valores para evaluar la periodicidad del impacto.

Criterio	Valor
Irregular	1
Periódico	2
Continuo	4

- Jerarquización de Impactos: En la Tabla 4.12 se detalla cómo se jerarquizó la significancia de los impactos.

Tabla 4.12: Jerarquización de impactos.

Criterio	Valor
Significativo	49 – 91
No Significativo	30 – 48
	< 30

El esquema general de esta etapa se describe en la Figura 4.4.

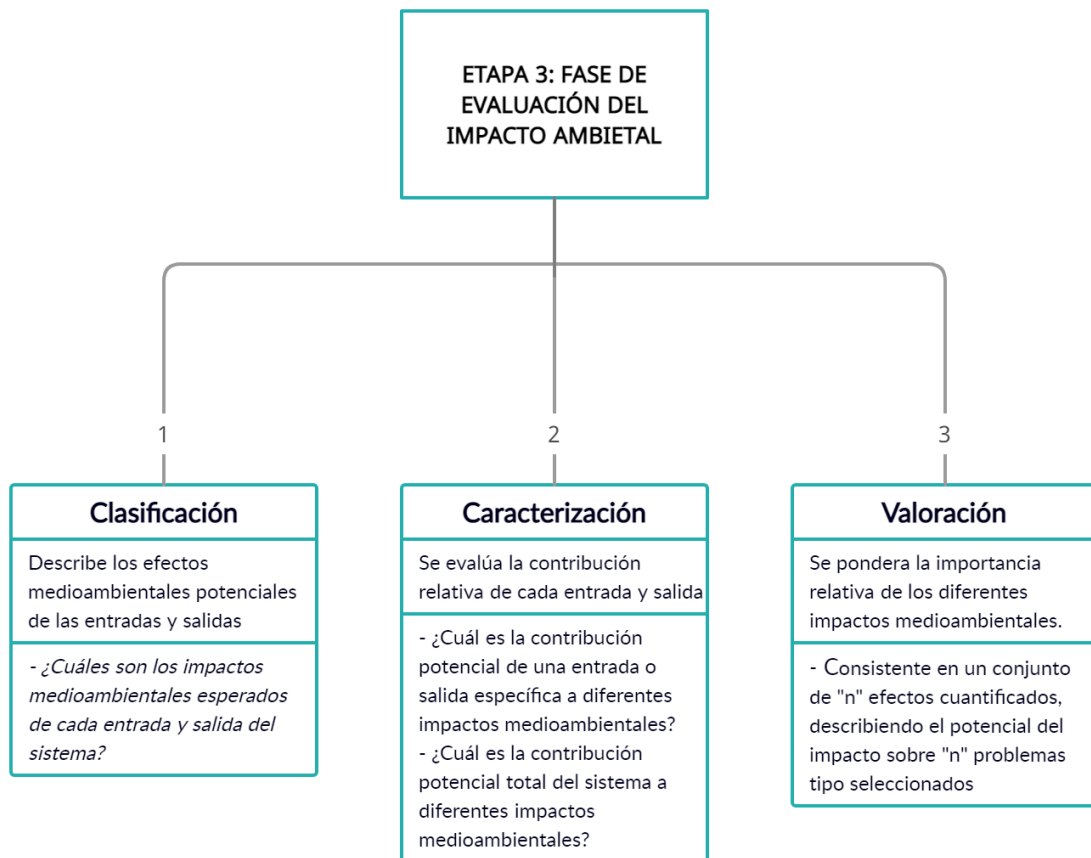


Figura 4.4: Esquema general de fase 3 de ACV. Fuente: Elaboración Propia

## 4.4 Fase de interpretación

La interpretación del ciclo de vida es la fase final del procedimiento de ACV, en ésta se resume y se discuten los resultados obtenidos en el ICV o de la ACV, o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos. En la figura 4.5 se resume lo que se buscó interpretar en esta fase, para así resolver pasivos ambientales que se identificaron.

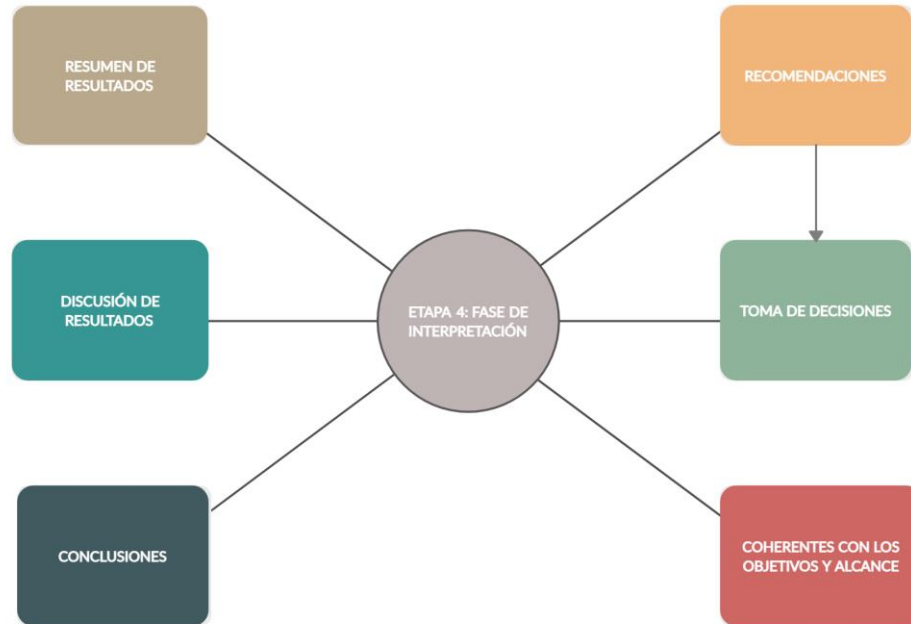


Figura 4.5: Esquema general de fase 4 de ACV. Fuente: Elaboración Propia

# 5. RESULTADOS

Este capítulo presenta la resolución del ACV para los paneles solares fotovoltaicos policristalinos, detallando cada etapa por separado para el cumplimiento de los objetivos propuestos anteriormente.

## 5.1 Fase de definición del objetivo y alcance

### 5.1.1 Objetivo

Como objetivo de la aplicación de análisis de ciclo de vida para los paneles solares fotovoltaicos policristalinos se buscó la cuantificación de la huella de carbono en sus diferentes procesos para una comparación con respecto a las energías no renovables en Chile y de esta manera poder obtener resultados para poder concluir con respecto al avance de la energía solar fotovoltaica en Chile.

### 5.1.2 Función del sistema

La función del sistema o producto con el cual se procedió el análisis de ciclo de vida fue la generación de energía. Función por la que pasó cada componente de un panel solar fotovoltaico policristalino.

### 5.1.3 Unidad funcional

La unidad funcional representa la base de cálculo sobre la cual se efectuaron los balances de materia y energía. La unidad funcional justificada a continuación se utilizó a lo largo de todas las cuantificaciones.

Como se mencionó anteriormente en el capítulo de metodología esta unidad es representativa para todo el proceso de ACV según su función y utilidad para todos los procesos que se cuantificaron.

A través de la exhaustiva revisión bibliográfica se pudo extraer que la tecnología de silicio sigue dominando el mercado en un 85 – 90% de la cuota de tecnología utilizada para la conformación de paneles solares. En cuanto al tipo de celdas solares en este caso se utilizarán como unidad funcional los paneles solares fotovoltaicos policristalinos, su justificación se detalló anteriormente debido el potencial que estos pueden tener en Chile.

Como unidad funcional se tomaron 1000kg de panel solar fotovoltaico policristalino. En la Tabla 5.1, se presenta la composición del panel solar fotovoltaico policristalino.

Tabla 5.1: Componentes de la unidad funcional.

Componente	Peso (kg)	Porcentaje (%)
Vidrio	700	70
Aluminio	180	18
EVA (Etil Vinil Acetato)	51	5.1
Silicio	36.5	3.65
Capa contraportada (Fluoruro de Polivinilo)	15	1.5
Cables	10	1
Conductor interno (Aluminio)	5.3	0.53
Conductor Interno (Cobre)	1.14	0.11
Plata	0.53	0.053
Otros Metales	0.53	0.053
<b>TOTAL</b>	<b>1000</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración Propia

Cabe destacar que, para efectos de este ACV, solo se consideraran los componentes que forman parte de la conformación de una panel solar fotovoltaico policristalino dejando de esta manera fuera tales como inversores o cables externos para la transmisión de energía.

#### 5.1.4 Límites del sistema

Para definir los límites primero que todo se descompone el sistema de los paneles solares fotovoltaicos policristalinos en subsistemas que permitan la identificación de procesos unitarios para el ciclo de vida dicho producto.

##### **A Subsistemas**

##### **A.1 Obtención de materias primas**

Subsistema enfocado en lo que compete a las materias primas primordiales para la elaboración de los paneles solares fotovoltaicos policristalinos considerando para este trabajo las 4 materias primas primordiales y de porcentaje mayor en cuanto a la conformación, estos componentes son vidrio, aluminio, EVA y silicio. Dejando fuera del límite aquellos componentes que para la elaboración del producto ocupan un porcentaje menor.

## **A.2 Producción de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos**

Este subsistema tiene relación plenamente con la elaboración de un panel solar fotovoltaico policristalino, considerando las entradas de las materias primas del anterior subsistema. Se consideran los porcentajes y pesos definidos para la unidad funcional, considerando los cuatro componentes definidos anteriormente.

## **A.3 Uso**

Subsistema con enfoque en la puesta en marcha de los paneles solares es decir con el traslados de ellos a un punto en específico, ya que éstos al estar en funcionamiento no producen emisiones hacia la atmósfera. También se considera el transporte del personal que debe realizar las mantenciones. La distancia corresponderá desde el centro de la ciudad de Copiapó hasta la planta Luz del Norte como ejemplificación para la estimación de emisiones

## **A.4 Reciclaje**

Subsistema donde se consideró el método de reciclaje térmico, debido a las mejores características que éste tiene en Chile, dejando fuera a los métodos de reciclaje químico y mecánico. Se consideró el traslado del panel solar a una planta de reciclaje desde el centro de la ciudad de Copiapó hasta la planta Luz del Norte como ejemplificación para la estimación de emisiones.

## ***B Límites Geográficos***

Este límite está establecido para el territorio de Chile, para la obtención de materias primas y procesos de transporte como también de métodos de reciclaje que se acondicionen a las condiciones nacionales. Al ser de carácter cristalinos y como se definió anteriormente, el enfoque fue en la zona norte del país comprendiendo las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama para consideraciones de transporte.

## ***C Excepciones***

Como excepciones a tomar en consideración para el ACV, primero se consideró la utilización del producto de paneles solares fotovoltaicos policristalinos, dejando fuera paneles solares conformados por diferentes materiales u otras tecnologías, esto permitió que no existiese confusión en la elección de datos para entradas y

salidas del sistema. De igual manera se excluyó el análisis de componentes por bajo de un 3% del peso en la conformación del panel solar, utilizando las recomendaciones de la ISO 14040.

Como se menciona en el subsistema de uso, en éste solamente se consideran los procedimientos para la conformación de la planta solar fotovoltaica, no el uso de éstos, ya que en este proceso no existen emisiones al momento de generar energía.

Para lo que se considera transporte solamente estuvo presente en cuanto a las mantenciones y el traslado de los paneles solares para la etapa de reciclaje, el mecanismo para el traslado fue terrestre dejando fuera alternativas como marítimas para el traslado de éstos.

Finalmente, para el proceso considerado en reciclaje solo se tomó el método térmico, ya que éste tiene la mejor consideración en Chile, donde se puede practicar sin ningún problema en comparación al método mecánico o químico.

#### **5.1.5 Requisitos de calidad de datos**

Los requisitos que se definen para la calidad de datos son:

- Geografía: Datos del territorio Chileno o aceptados por Ministerio de Medioambiente.
- Integridad: Datos que sean medidos y estimaciones apropiadas.
- Tiempo: Últimos datos obtenidos en relación a factores de emisión o datos desde el año 2000 en adelante.
- Representatividad: Datos ajustados a la función definida en la fase 1 de ACV
- Fuente: Estudios técnicos, tesis de pregrado y postgrado, documentos científicos e informes oficiales del Gobierno de Chile.

## 5.2 Fase de Análisis de inventario

En una primera instancia con respecto a la recopilación de datos que se utilizó, se destaca la procedencia de éstos, denotando la solidez de cada dato recopilado. Los factores de emisión utilizados para la cuantificación de emisión que se obtuvo tienen procedencia de documentos del gobierno relacionados a la “guía metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuentes puntuales”, documentos de la IPCC “Directrices del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero” y también datos de AP42 de la US-EPA. Cabe destacar que, a pesar de ser datos internacionales en algunos casos, éstos son aceptados por parte del gobierno para la cuantificación de emisiones, siendo utilizados en documentación oficial por el Ministerio de medioambiente y salud de Chile (Ministerio de Medioambiente, 2019).

Luego se realizó una recopilación y cálculo de las entradas como salidas a cada subsistema como se definió anteriormente, de esta manera logrando cuantificar las emisiones para cada operación unitaria. Se separan en emisiones de materia y energía, que permiten diferenciar las emisiones tanto del proceso químico en sí como de los combustibles utilizados para llevar a cabo la fabricación de los productos.

### 5.2.1 Obtención de materias primas

En este subsistema se cuantificaron las emisiones producidas para la fabricación de las materias primas de los paneles solares, mencionados anteriormente en la unidad funcional.

#### 5.2.1.1 Vidrio Templado

Para la fabricación del vidrio templado se definen los siguientes procesos:

- Fusión: Las materias primas para la fabricación del vidrio templado son arena de sílice, carbonato de sodio, caliza y vidrio reciclado, estas materias primas entran en un horno a 1600°C, en donde el carbonato de sodio ayuda a disminuir la temperatura de fusión de la arena de sílice y mientras que la caliza favorece a que el material no se descomponga en el agua, de esta manera se obtiene vidrio fundido. Se destaca la función del vidrio reciclado como una alternativa de recirculación en este proceso en caso de generación de residuos sólidos que se puedan emitir en las etapas de fabricación o como un sistema de reciclaje para el vidrio templado.

- Flotación sobre estaño: A 1000°C se hace flotar el vidrio fundido que se dispone sobre un baño de estaño para poder obtener una superficie plana y uniforme, para finalmente dejar enfriar obteniendo vidrio fundido de una consistencia viscosa y pegajosa.
- Recocido: Para provocar una mejor tensión superficial y obtener un vidrio de mejores características entra en un proceso de recocido que no llega a la temperatura de fusión del vidrio, de esta manera se lleva a temperaturas bajo los 600°C para luego dejar enfriar hasta los 80°C.
- Corte: Una vez que se obtiene el vidrio se procede a cortar con una punta diamante, obteniendo vidrio de las medidas exactas para la conformación del panel solar.
- Templado: Finalmente el vidrio pasa a su proceso de templado en donde las características que hasta este momento contiene el vidrio cambian de manera beneficiosa para la obtención de un vidrio templado que conlleva mejor resistencia al impacto, mejor esfuerzo térmico y mayor resistencia a la reflexión. Este proceso se lleva a cabo en un horno de templado, que consta de una cámara de calentamiento mediante resistencias eléctricas y una cámara de enfriamiento.

Para llevar a cabo las cuantificaciones de cada proceso se identifican las entradas y salidas del sistema, estas se dejan evidenciadas en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Entradas y salidas para la fabricación de vidrio

PROCESO	ENTRADAS	SALIDAS
Fusión	Combustible LNG Arena de Sílice Carbonato de Sodio Caliza Vidrio reciclado	Vidrio Fundido NO <sub>x</sub> SO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> CO MP <sub>2.5</sub> MP <sub>10</sub>
Flotado en Estaño	Combustible LNG Vidrio Fundido	Vidrio Flotado NO <sub>x</sub> SO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> CO MP <sub>10</sub>
Recocido	Combustible Vidrio Flotado	Vidrio Plano CO <sub>2</sub>
Corte	Electricidad Vidrio Plano	Vidrio Plano CO <sub>2</sub>
Templado	Vidrio Plano Electricidad	Vidrio Templado NO <sub>x</sub> SO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> CO MP <sub>10</sub>

A partir de la identificación de las entradas y salidas, se cuantificaron los flujos producidos ya sea por la materia como también con el uso de energía. De esta manera, se ocupó la unidad funcional correspondiente al porcentaje del vidrio en la composición final del panel solar, es decir 0,7 ton de vidrio templado. A continuación, en la Figura 5.1 se muestran los resultados obtenidos para cuantificar las entradas y salidas a cada uno de los procesos para la fabricación de vidrio templado, exceptuando las emisiones producidas.

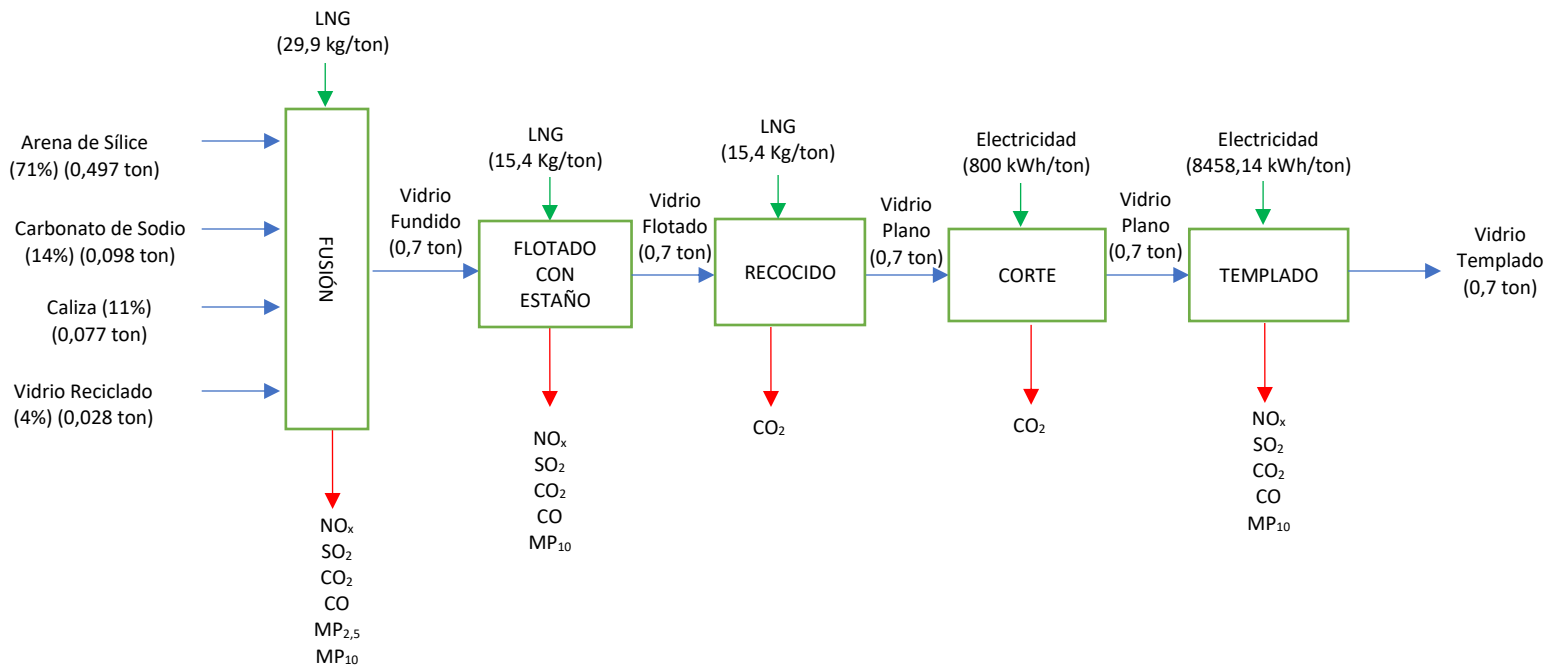


Figura 5.1: Diagrama para la fabricación de vidrio templado

Para la cuantificación de las emisiones producidas en cada uno de los procesos, se ocuparon los siguientes factores de emisión relacionados a las entradas y salidas de materia como también a la energía, en donde el nivel de actividad se relacionó con la unidad funcional de vidrio para cuantificar las emisiones producidas por el balance de materia, para la energía en cuanto a la cantidad de energía en kWh para la ocupación de electricidad y en kg para el uso de combustibles necesarios para la generación de 0,7 ton de vidrio templado.

Los factores de emisión utilizados se presentan a continuación en la tabla 5.3 para lo que compete a materia y en la Tabla 5.4 para energía.

Tabla 5.3: Factores de emisión para la cuantificación relacionado a las entradas de materia en los procesos

FACTORES DE EMISIÓN DE MATERIA						
PROCESO	NO <sub>x</sub> (kg/ton)	SO <sub>2</sub> (kg/ton)	CO (kg/ton)	CO <sub>2</sub> (kg/ton)	MP <sub>2.5</sub> (kg/ton)	MP <sub>10</sub> (kg/ton)
Fusión	3,6287	1,3608	0,0454	0,21	0,8165	0,8618
Flotado	9,0718	13,6078	0,4536	0,19	-	6,8039
Recocido	-	-	-	0,19	-	-
Corte	-	-	-	-	-	-
Templado	0,1225	0,0181	0,0277	0,19	-	0,2177

Tabla 5.4: Factores de emisión para la cuantificación relacionado a las entradas de energía en los procesos

FACTORES DE EMISIÓN DE ENERGÍA		
PROCESO	CO <sub>2</sub>	Unidad
Fusión	0,79	kgCO <sub>2eq</sub> /kg
Flotado	0,79	kgCO <sub>2eq</sub> /kg
Recocido	0,79	kgCO <sub>2eq</sub> /kg
Corte	0,4056	KgCO <sub>2eq</sub> /kWh
Templado	0,4056	KgCO <sub>2eq</sub> /kWh

Con estos factores de emisión se procedió a la cuantificación de emisiones, estos resultados se muestran en la Tabla 5.5 para estimación de emisiones totales en la fabricación de vidrio templado.

Tabla 5.5: Estimación de emisiones totales en la fabricación de vidrio templado

ESTIMACIÓN DE EMISIONES TOTALES FABRICACIÓN DE VIDRIO						
PROCESO	NO <sub>x</sub> (kg)	SO <sub>2</sub> (kg)	CO (kg)	CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2eq</sub> )	MP <sub>2.5</sub> (kg)	MP <sub>10</sub> (kg)
Fusión	2,54009	0,95256	0,03178	16,6817	0,57155	0,60326
Flotado	6,35026	9,52546	0,31752	8,6492	-	4,76273
Recocido	-	-	-	8,6492	-	-
Corte	-	-	-	227,136	-	-
Templado	0,08575	0,01267	0,01939	2401,568109	-	0,15239

### 5.2.1.2 Marcos de Aluminio

Para la fabricación de los marcos de aluminio se toman dos procesos principales para poder conseguir aluminio puro y un último proceso donde se le da la forma necesaria para la conformación de los paneles solares.

- Proceso Bayern: Para la producción de aluminio se tienen como materias primas la bauxita, sosa cáustica y óxido de calcio. La bauxita se lava para eliminar impurezas que son solubles en agua. Luego se tritura para obtener granos pequeños, por medio de una trituradora y pasa a una disolución acuosa con sosa cáustica para obtener óxido de aluminio, pero con impurezas. La sosa cáustica se recircula al sistema a través de evaporadores, esta recirculación se le conoce como lejía de sosa. Finalmente, el óxido de calcio con impurezas pasa a un proceso de calcinación donde actúa el óxido de calcio para la eliminación de impurezas obteniendo óxido de aluminio puro.

- Proceso de Hall – Héroult: A través de este método el óxido de aluminio obtenido anteriormente se mezcla con la criolita que actúa como fundente. Se somete a hidrólisis donde se lleva a una temperatura de 900°C. De esta manera el aluminio se separa del electrolito.

- Extrusión: El proceso final para la conformación del marco de aluminio de un panel solar consta con llevar a una temperatura de 500°C el aluminio obtenido anteriormente, de esta manera alcanza un estado plástico y maleable. Una vez que comienza a fluir a través de la matriz se deja caer sobre el perfil de las medidas necesarias para la conformación del marco de aluminio, así permite obtener las medidas de los marcos para un ensamblaje exacto del panel solar.

Para estos procesos descritos se logró identificar tanto las entradas como salidas, que se muestran a continuación de la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Entradas y salidas para la fabricación de marcos de aluminio

PROCESO	ENTRADAS	SALIDAS
Bayern	Electricidad Sosa Caustica Bauxita Oxido de calcio	Óxido de Aluminio Residuos Sólidos Lejía de Sosa SO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> MP <sub>10</sub>
Hall – Heroúlt	Electricidad Óxido de Aluminio	Aluminio NO <sub>x</sub> SO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub>
Extrusión	Electricidad Aluminio	Marcos de Aluminio CO <sub>2</sub>

A partir de la identificación de las entradas y salidas de cada uno de los procesos de fabricación de marcos de aluminio se pueden cuantificar ambos tipos de flujos, estos resultados se muestran en la Figura 5.2, en donde para la realización de cálculos se toma como unidad funcional el porcentaje correspondiente a aluminio descrito anteriormente, que son 180 kg pero que para efectos de cálculos que se realizó queda en 0.18ton de aluminio.

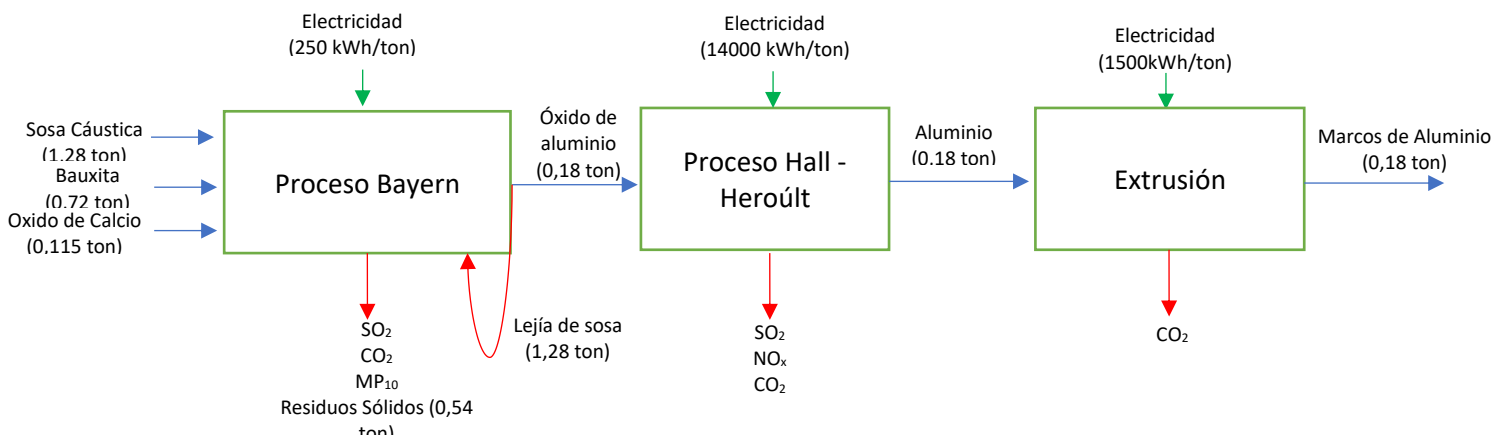


Figura 5.2: Diagrama para la fabricación de marcos de aluminio

A continuación, se muestran los factores de emisión utilizados para las estimaciones de emisión en ambos casos, tanto de materia como de energía. De esta manera se logró cuantificar para cada procesos sus emisiones individuales. Cabe destacar que como nivel de actividad se han utilizado los 0,18 ton de aluminio, determinados desde su unidad funcional, para los casos de uso de electricidad como energía cada una de las corrientes se calculó previamente como se mostró en la Figura 5.2 para poder utilizarlas en las estimaciones de emisión.

Los factores de emisión utilizados se presentan a continuación en la Tabla 5.7 para lo que compete a materia y en la Tabla 5.8 para la energía.

Tabla 5.7: Factores de emisión para la cuantificación de materia relacionado a las entradas de materia en los procesos

<b>FACTORES DE EMISIÓN DE MATERIA</b>			
<b>PROCESO</b>	<b>NO<sub>x</sub> (kg/ton)</b>	<b>SO<sub>2</sub> (kg/ton)</b>	<b>MP<sub>10</sub> (kg/ton)</b>
Bayern	-	0,0091	6,0327
Hall Heroúlt	0,0045	0,0091	-
Extrusión	-	-	-

Tabla 5.8: Factores de emisión para la cuantificación de energía relacionado a las entradas de energía en los procesos

<b>FACTORES DE EMISIÓN DE ENERGÍA</b>		
<b>PROCESO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Unidad</b>
Bayern	9160	kgCO <sub>2eq</sub> /ton
Hall Heroúlt	9160	kgCO <sub>2eq</sub> /ton
Extrusión	0,4056	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh

Con estos factores de emisión se procedió a la cuantificación de emisiones, estos resultados se muestran en la Tabla 5.9 para las emisiones totales en la fabricación de marcos de aluminio.

Tabla 5.9: Estimación de emisiones totales en la fabricación de marcos de aluminio.

<b>ESTIMACIÓN DE EMISIONES TOTALES FABRICACIÓN MARCOS DE ALUMINIO</b>				
<b>PROCESO</b>	<b>NO<sub>x</sub> (kg)</b>	<b>SO<sub>2</sub> (kg)</b>	<b>MP<sub>10</sub> (kg)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (kgCO<sub>2eq</sub>)</b>
Bayern	-	0,001638	1,085886	6750
Hall Heroúlt	0,00081	0,001638	-	648000
Extrusión	-	-	-	109,512

### 5.2.1.3 Etil Vinil Acetato (EVA)

Para la fabricación de EVA se definen los siguientes procesos:

- Polimerización: Este proceso se lleva a cabo con las materias primas de Etileno y Vinil Acetato, el etileno se polimeriza a través de radicales libres como por ejemplo el poliestireno, a presiones y temperaturas elevadas que van desde los 150°C hasta los 300°C, con variaciones de presión que van desde los 103 MPa hasta los 345MPa a este proceso se le alimenta una corriente controlada de Vinil Acetato. En una primera instancia se lleva el etileno a un compresor primario aumentando su presión y luego pasa a otro compresor de alta presión llegando a los 350Mpa, para pasar posteriormente al reactor en donde se alimenta el Vinil Acetato y donde ocurre la reacción de polimerización. Hay un porcentaje de Etileno que no reacciona, para esto se pasa a un separador de alta presión donde la corriente de etileno que no reacciona se recircula al sistema, evitando la mayor cantidad de pérdidas en este proceso, finalmente se logran obtener los gránulos de EVA como producto de la polimerización.

- Extrusión: Luego de la conformación de los gránulos de EVA, éstos pasan al proceso donde se formará el film de EVA, la extrusión consiste en la entrada de los gránulos a una temperatura producida por resistencias eléctricas, al calentarse proceden a pasar por unos rodillos que aplican presión para obtener un film de EVA, su etapa final se centra en volver a pasar el film EVA por unos rodillos refrigerantes, obteniendo el espesor final necesario agrupados en rollos de EVA y que se utilizan para la conformación de esta materia prima en el panel solar.

Con los procesos descritos anteriormente se logró identificar las entradas y salidas del sistema tanto de materia como de energía y las emisiones relacionadas a los diferentes procesos para la obtención de EVA. Estas entradas y salidas se muestran en la Tabla 5.10, dividido en cada uno de los procesos.

Tabla 5.10: Entradas y salidas para la fabricación de film EVA

PROCESO	ENTRADAS	SALIDAS
Polimerización	Electricidad Etileno Vinil Acetato	Gránulos de EVA CO <sub>2</sub> Recirculación de Etileno
Extrusión	Electricidad Gránulos de EVA	Film EVA CO <sub>2</sub>

Con la previa identificación de las entradas y salidas de los procesos, se logró cuantificar dichos flujos obteniendo valores para la realización de la cuantificación de emisiones producidas, en la Figura 5.3 se muestra el diagrama de flujo para la fabricación de film EVA, en donde la cuantificación de emisiones no se aprecia, pero si las emisiones relacionadas a dichos procesos.

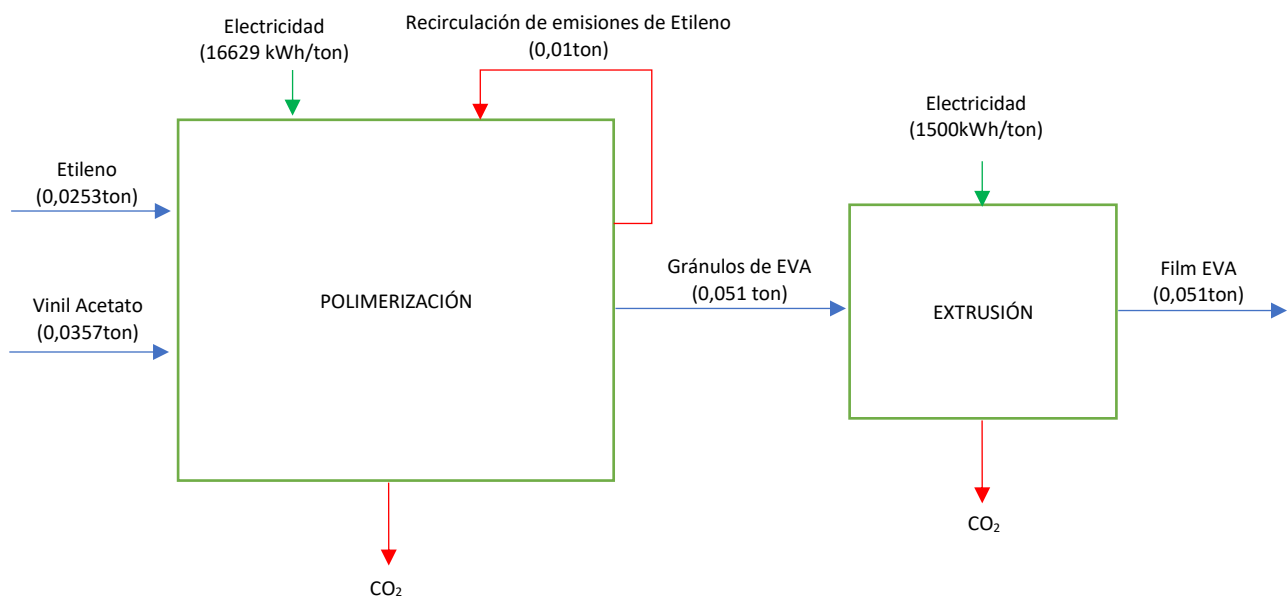


Figura 5.3: Diagrama para la fabricación de Film EVA

Teniendo en cuenta la identificación y cuantificación de las entradas y salidas, se procedió a la cuantificación de emisiones de dichos procesos. De esta manera se recopilamos los factores de emisión para cada una de las emisiones. Estos datos se muestran en la Tabla 5.11 para materia y en la Tabla 5.12 para energía. Ya con los factores de emisión claros se realizó la estimación de emisiones totales para la fabricación de film EVA, cada uno de estos valores se muestran en la Tabla 5.13.

Tabla 5.11: Factores de emisión relacionadas con materia en la fabricación de film EVA.

<b>FACTORES DE EMISIÓN MATERIA</b>		
<b>PROCESO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Unidad</b>
Polimerización	2617	kgCO <sub>2eq</sub> /ton
Extrusión	-	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh

Tabla 5.12: Factores de emisión relacionadas con energía en la fabricación de film EVA.

<b>FACTORES DE EMISIÓN ENERGÍA</b>		
<b>PROCESO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Unidad</b>
Polimerización	0,4056	kgCO <sub>2eq</sub> /ton
Extrusión	0,4056	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh

Tabla 5.13: Estimación de emisiones totales en la fabricación de film EVA.

<b>ESTIMACIÓN DE EMISIONES TOTALES EN LA FABRICACIÓN DE FILM EVA</b>		
<b>PROCESO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Unidad</b>
Polimerización	477,448	kgCO <sub>2eq</sub>
Extrusión	31,0284	kgCO <sub>2eq</sub>

#### 5.2.1.4 Fabricación de Silicio de Grado Eléctrico

Para la obtención de silicio de grado eléctrico se definen los siguientes procesos:

- Fundición: Como materias primas para llevar a cabo este proceso se tiene el cuarzo, este compuesto tiene silicio, oxígeno y otros metales dentro de su composición, en donde para obtener solo el silicio se tiene que llevar a temperaturas de 1500-200°C en un horno de arco eléctrico. En este proceso de fundición se somete a campos eléctricos que rompen los enlaces químicos que unen al silicio con el oxígeno, resultando de esta manera silicio de grado metalúrgico, el que aún tiene características de impurezas, por lo que es necesario seguir procesándolo para obtener silicio más puro.

-Proceso de Siemens: Este proceso se lleva a cabo con el silicio de grado metalúrgico obtenido, pero en forma de gas, para esto se hace reaccionar con HCl a 300°C en un reactor formando SiHCl<sub>3</sub> para luego hacerlo reaccionar con hidrógeno a 1100°C durante 200-300 horas. A través de este proceso se obtiene silicio puro y el HCl utilizado se recircula, el que se lleva a cabo al vacío, obteniendo un bloque finalmente de silicio de grado eléctrico policristalino.

Con esta información se procedió a identificar tanto las entradas como salidas de estos procesos, que en la Tabla 5.14 se detallan.

Tabla 5.14: Entradas y salidas para la fabricación de film EVA

PROCESO	ENTRADAS	SALIDAS
Fundición	Electricidad Cuarzo	Silicio de grado metalúrgico Humo de sílice Residuos Sólidos CO <sub>2</sub>
Proceso de Siemens	Electricidad Silicio de grado metalúrgico	Silicio de grado eléctrico policristalino CO <sub>2</sub>

La identificación de entradas y salidas permitió la cuantificación de dichas entradas y salidas descritas, que competen a materia y energía. Se destacó que el humo de sílice que se obtiene como emisión en el proceso de fundición se cuantifica, pero no se utiliza como dato ya que éste corresponde a materia prima para otros procesos. En la Figura 5.4 se detalla cada uno de los valores obtenidos por los flujos de entrada y salida, en donde como unidad funcional se ocupó los 0.0365ton de silicio de grado eléctrico policristalino que conforma parte del panel solar.

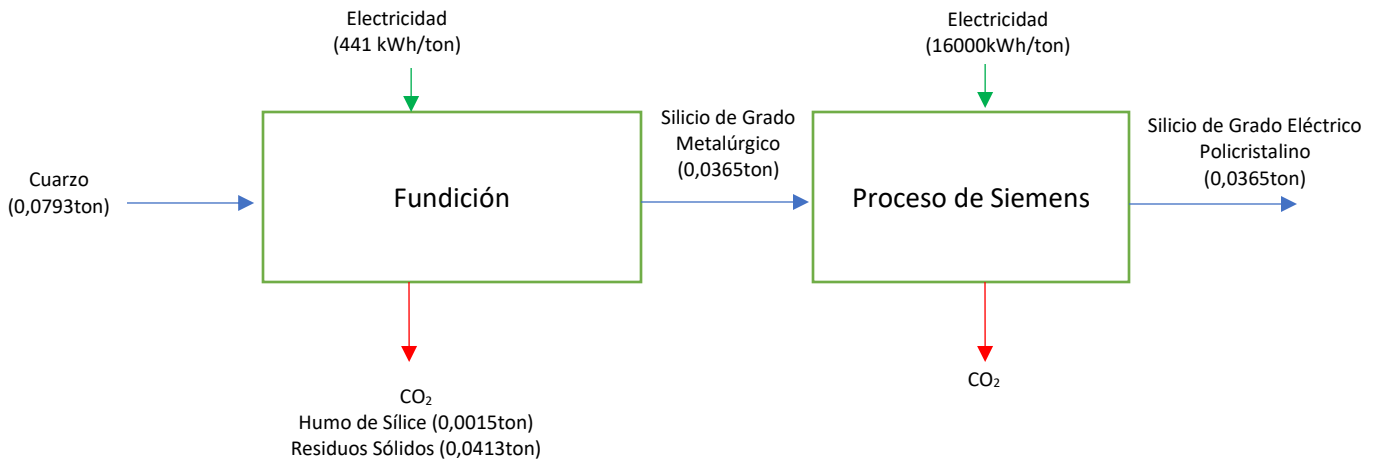


Figura 5.4: Diagrama para la fabricación de Silicio de grado eléctrico policristalino

Procediendo con la cuantificación para la obtención de este producto se procedió a la estimación de emisiones, empleando los datos obtenidos de factores de emisión sobre energía para cuantificar estos valores. En este proceso se menciona las nulas emisiones de los procesos ya que la fundición genera emisiones de compuestos que son materias primas para otros procesos y del proceso de siemens se logra recircular las emisiones relacionadas a materia. En la Tabla 5.15 se evidencian los factores de emisión utilizados y en la Tabla 5.16 las estimaciones de emisiones totales en la fabricación de silicio de grado eléctrico policristalino.

Tabla 5.15: Factores de emisión relacionadas con energía en la fabricación de silicio de grado eléctrico policristalino.

FACTORES DE EMISIÓN ENERGÍA		
PROCESO	CO <sub>2</sub>	Unidad
Fundición	0,4056	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh
Siemens	0,4056	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh

Tabla 5.16: Estimación de emisiones totales en la fabricación de silicio de grado eléctrico policristalino.

ESTIMACIÓN DE EMISIONES TOTALES EN LA FABRICACIÓN DE SILICIO DE GRADO ELÉCTRICO POLICRISTALINO		
PROCESO	CO <sub>2</sub>	Unidad
Fundición	6,5287404	kgCO <sub>2eq</sub>
Siemens	236,8704	kgCO <sub>2eq</sub>

### 5.2.2 Producción de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos

Esta etapa constó de la conformación del panel solar como producto, en donde cada uno de los productos que se obtuvo en el subsistema de obtención de materias primas se aplicaron para formar el panel solar policristalino.

Para la fabricación de los paneles solares se necesitó de los siguientes procesos:

- Primer Corte: Este proceso tiene como principal objetivo obtener bloques más pequeños de silicio para la fabricación de las obleas. El gran bloque de silicio de grado eléctrico policristalino entra a una cortadora que contiene una matriz de cables acomodados con carretes, que al realizar un movimiento en sentidos opuestos y bajando en dirección al bloque de silicio cortan el bloque en 25 partes iguales, este proceso de cortado dura aproximadamente 7 horas, obteniendo de esta manera pequeños bloques de silicio policristalino para formar las obleas.

- Segundo Corte: De igual manera que el proceso anterior, el objetivo es poder cortar los bloques pequeños en obleas de silicio que formaran las celdas solares. El bloque de silicio entra a una cortadora, pero de menor escala, ahora se producirán láminas u obleas delgadas que se transformarán en celdas solares. Este proceso dura 8 horas entre las cuales se pueden obtener entre 2000 y 3000 láminas de silicio.

- Unión P-N: Este proceso consta de la unión de un dopante de tipo p con uno de tipo n, el dopante de tipo p se refiere al contenido de Bromo contenido en los bloques y la composición de silicio en la superficie, esta unión tiene como objetivo formar la red cristalina. Las obleas de silicio se rocían con fósforo en forma de gas en hornos de altas temperaturas de alrededor de 900-100°C. De esta manera se obtienen celdas solares capaces de generar electricidad.

- Inserción de contactos: Para la transmisión de la generación de energía al sistema de red desde el panel solar, se insertan contactos de plata a las celdas solares tanto frontalmente como en la zona posterior de éstas. Como requisitos estos contactos deben tener baja resistencia al sílice, baja resistividad, baja relación ancho-largo de los contactos, buena adhesión mecánica, facilidad al soldar y compatibilidad con el encapsulado que tienen las celdas. Se lleva a temperaturas con resistencias eléctricas para un mejor proceso de soldado, obteniendo de esta manera, celdas solares listas para la conformación del panel solar.

- Encapsulado: Este proceso busca la protección de las celdas solares y los contactos insertados anteriormente, el rol principal para esta función la cumple el film EVA, en donde mediante una laminadora que se lleva a temperatura de 145°C y al vacío, encapsula a la celda solar con el EVA, dándole mejores características de seguridad al producto, este proceso se lleva a cabo en 30 minutos.

- Ensamblaje: Finalmente para la obtención del panel solar policristalino se procede al ensamblaje de las principales materias primas, el vidrio templado se ensambla con las celdas solares encapsuladas brindando una capacidad de seguridad absoluta para luego proceder al anclaje de los marcos de aluminio con el mayor cuidado posible, obteniendo el panel solar fotovoltaico policristalino. Este proceso no se taladra ya que puede provocar la rotura de las celdas solares.

Ya con los procesos descritos, se logran identificar las entradas y salidas de éstos. Los flujos tanto de materia como de energía se muestran en la Tabla 5.17, describiéndose también sus emisiones relacionadas.

Tabla 5.17: Flujos de entrada y salida para la producción de paneles solares fotovoltaicos policristalinos

PROCESO	ENTRADAS	SALIDAS
Primer Corte	Electricidad Silicio de grado eléctrico	Bloques pequeños de silicio de grado eléctrico CO <sub>2</sub>
Segundo Corte	Electricidad Bloques pequeños de silicio de grado	CO <sub>2</sub> Obleas de Silicio
Unión P-N	Electricidad Obleas de Silicio Fósforo	Celdas Solares CO <sub>2</sub>
Inserción de Contactos	Electricidad Contactos de Plata Celdas Solares	Celdas Solares CO <sub>2</sub>
Encapsulado	Electricidad EVA	Celdas Solares Policristalinas Encapsuladas CO <sub>2</sub>
Ensamblaje	Celdas Solares Policristalinas Encapsuladas Marcos de Aluminio Vidrio Templado	Panel Solar Fotovoltaico Policristalino

A través de la identificación de las entradas y salidas de los procesos para la fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalino, se procedió a cuantificar los flujos identificados de materia y energía. Las emisiones en este caso se relacionaron al uso de energía para los procesos, ya que en si no competen emisiones relacionadas a las materias primas ingresadas en ellos. Cabe destacar que el fósforo no se cuantifica ya que químicamente no actúa de manera cuantificable en peso ni como emisión. En la Figura 5.5 y 5.6 se muestran el diagrama que se obtuvo con la cuantificación de los flujos de entrada y salida para cada proceso.

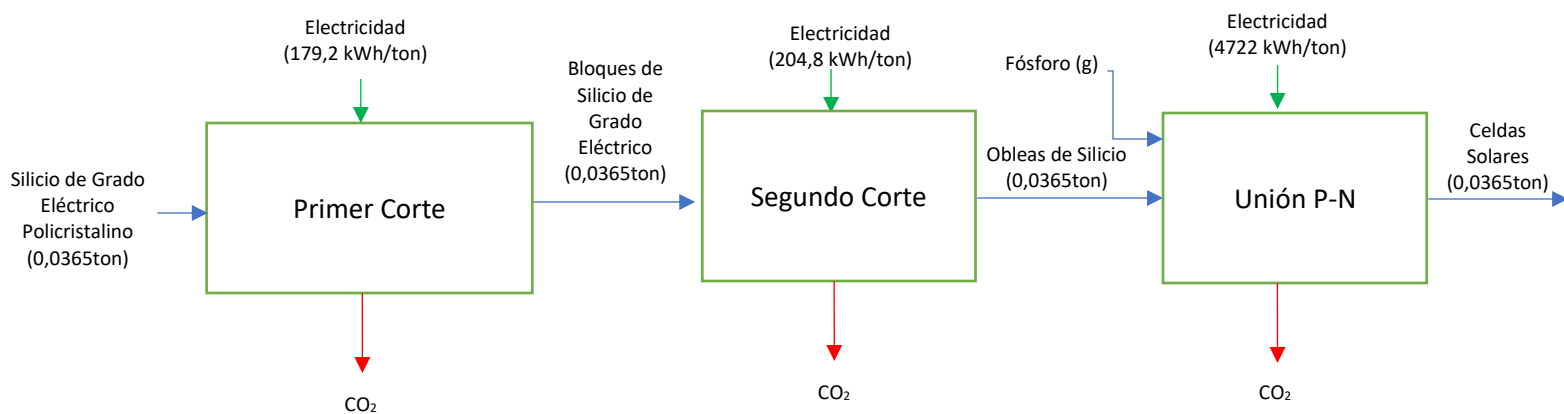


Figura 5.5: Diagrama para la fabricación de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos

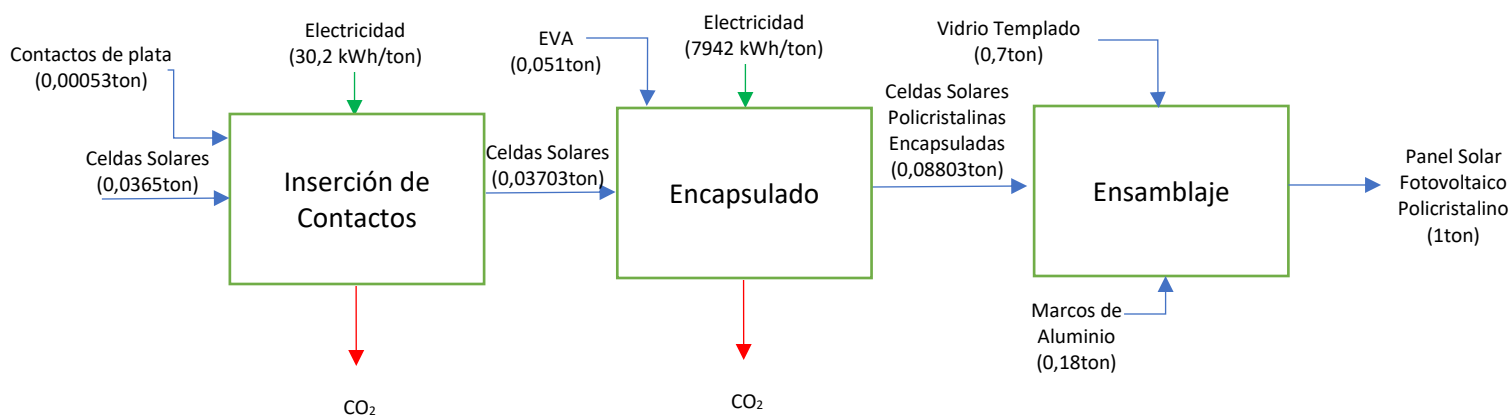


Figura 5.6: Diagrama para la fabricación de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos (Continuación)

Con la identificación de los flujos de entrada y salida, se prosiguió a la aplicación de la metodología para la cuantificación de las emisiones para cada uno de los procesos. Como se mencionó anteriormente, las emisiones en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos está relacionada a la energía aplicada para llevar a cabo los procesos. En la Tabla 5.18 se evidencian los factores de emisión utilizados para cada proceso y en la Tabla 5.19 la estimación de emisiones totales relacionadas a cada uno de ellos.

Tabla 5.18: Factores de emisión relacionadas con energía en la fabricación de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos.

<b>FACTORES DE EMISIÓN ENERGÍA</b>		
<b>PROCESO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Unidad</b>
Primer Corte	0,4056	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh
Segundo Corte	0,4056	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh
Unión P-N	0,4056	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh
Inserción	0,4056	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh
Encapsulado	0,4056	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh

Tabla 5.19: Estimación de emisiones totales en la fabricación de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos.

<b>ESTIMACIÓN DE EMISIONES TOTALES EN LA FABRICACIÓN DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS POLICRISTALINOS</b>		
<b>PROCESO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Unidad</b>
Primer Corte	2,65294848	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh
Segundo Corte	3,03194112	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh
Unión P-N	69,9063768	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh
Inserción	0,45358491	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh
Encapsulado	3118,29103	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh

### 5.2.3 Uso

La etapa de producción se centró en la mantención del panel solar fotovoltaico policristalino ya que el uso y la puesta en marcha de este tipo de energía no contiene emisiones relacionadas con ella, lo cual hace referencia a su calificativo de energía limpia, no obstante, no se puede dejar fuera el proceso de mantención. La mantención de paneles solares es de manera simple ya que la sobre manipulación de éste puede causar daños irreparables que pueden ocasionar la rotura de las celdas solares, teniendo como resultado un panel solar sin funcionamiento o de baja eficiencia. Esta mantención consta de un proceso de limpieza superficial del polvo contenido con la remoción de escobillas mecánicamente por profesionales encargados para esta labor. Se consideró para la cuantificación de emisiones el traslado del personal para la debida mantención, los factores de emisión que se utilizaron se muestran en la Tabla 5.20 y en la Tabla 5.21 se observa la estimación de emisiones relacionadas.

Tabla 5.20: Factores de emisión para la mantención de los paneles solares fotovoltaicos policristalinos

FACTORES DE EMISIÓN				
PROCESO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Unidad
Mantención	0,2049	0,0003	0,0045	kgCO <sub>2eq</sub> /persona-km

Tabla 5.21: Estimación de emisiones totales sobre mantención de los paneles solares fotovoltaicos policristalinos

ESTIMACIÓN DE EMISIONES TOTALES SOBRE MANTENCIÓN DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS POLICRISTALINOS				
PROCESO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Unidad
Mantención	14,93721	0,02187	0,32805	kgCO <sub>2eq</sub>

#### 5.2.4 Reciclaje

Esta etapa se realiza al término de la vida útil de un panel solar, que es estimada entre los 20 – 25 años de uso, para esto se realiza un reciclaje de tipo térmico. Sus procesos se describen a continuación

- Separación Mecánica: Este proceso tiene como objetivo principal desarmar el ensamblaje del panel solar, es decir quitar en una primera instancia los marcos de aluminio y luego el vidrio templado, realizado con una estructura que permita el desensamble del marco de aluminio que con el pasar de los años se adhiere de mejor manera, para luego quitar de forma manual el vidrio templado, ambos materiales pueden ser reutilizados en la conformación de un panel solar nuevo o reciclado para formar otros productos.

- Incineración: Con la separación de estos materiales, como producto se obtiene la celda solar con menor protección, ésta se lleva a un proceso de incineración donde se busca eliminar la capa de EVA llevándolo a su punto de sublimación, quedando las obleas solares sin encapsular, libres para su reutilización o reciclaje. De esta manera se logra descomponer el panel solar en materias primas para otros procesos e incluso para la conformación de un nuevo panel solar.

Con la descripción de los procesos se logró identificar de manera correcta las entradas y salidas de los procesos, de energía como también de materias primas, éstas se pueden evidenciar en la Figura 5.7. En la tabla 5.22 se muestran los factores de emisión utilizados para la cuantificación de emisiones para el reciclaje térmico. Los resultados de la estimación de emisiones se presencian en la tabla 5.23

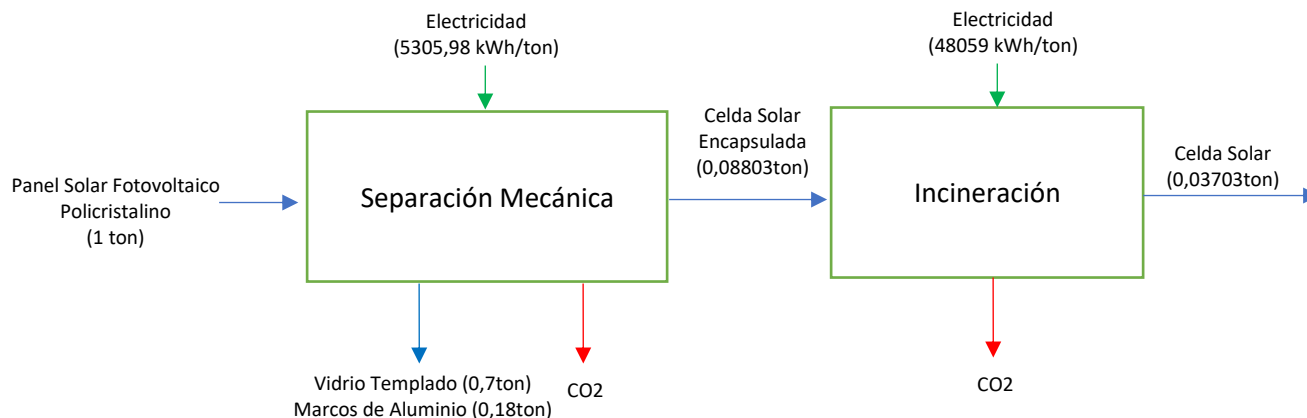


Figura 5.7: Diagrama para el reciclaje térmico de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos.

Tabla 5.22: Factores de emisión sobre reciclaje térmico de los paneles solares fotovoltaicos policristalinos.

FACTORES DE EMISIÓN				
PROCESO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Unidad
Separación Mecánica	0,4056	-	-	KgCO <sub>2</sub> eq/kWh
Incineración	0,4056	-	-	KgCO <sub>2</sub> eq/kWh
Traslado	2698,5459	3,9768	37,6376	kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>

Tabla 5.23: Estimación de emisiones relacionadas con energía en la mantención de los paneles solares fotovoltaicos policristalinos.

ESTIMACIÓN DE EMISIONES RECICLAJE TÉRMICO				
PROCESO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Unidad
Separación Mecánica	2152,105488	-	-	KgCO <sub>2</sub> eq
Incineración	1715,945057	-	-	KgCO <sub>2</sub> eq
Traslado	5427,585369	7,99853784	75,70050488	kgCO <sub>2</sub> eq

## **5.3 Fase de evaluación del impacto ambiental**

De acuerdo a los flujos de entrada y salida para cada sistema descrito anteriormente con sus respectivos procesos, se logró identificar aspectos e impactos ambientales relacionados con dichas entradas y salidas, de esta manera se realizó la clasificación, caracterización y valoración.

Esta matriz constó de la identificación de la actividad, relación de ésta con su aspecto e impacto ambiental, una valoración y la significancia para cada impacto. Cada impacto ambiental se relacionó con un ID para su identificación de manera efectiva.

### **5.3.1 Obtención de materias primas**

Primero se realizaron las matrices para este subsistema, logrando la obtención de los siguientes resultados.

#### **5.3.1.1 Fabricación de Vidrio Templado**

La realización de la matriz de impactos ambientales para las entradas y salidas de la fabricación de vidrio templado dio como resultado una cantidad de 71 impactos ambientales, de los cuales resultó 8 significativos. La identificación de los impactos ambientales se evidencia en el Anexo A1, en donde se aprecia la totalidad de ellos para la fabricación de vidrio. En la Tabla 5.22 se observan los impactos ambientales significativos y en la Tabla 5.23 los criterios para cada variable que se sometió a evaluación.

Tabla 5.24: Identificación de los impactos ambientales para la fabricación de vidrio templado

ID	SUBSISTEMA	ETAPA	ASPECTO	IMPACTO
A1	FABRICACIÓN DE VIDRIO TEMPLADO	FUSIÓN	EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
A2			EMISIÓN DE SO2	
A6			EMISIÓN DE CO2	
A12			EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN DE GEI
A30		FLOTACIÓN CON ESTAÑO	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
A35			EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN DE GEI
A47		RECOCIDO	EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN DE GEI
A61		TEMPLADO	EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN DE GEI

Tabla 5.25: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la fabricación de vidrio templado.

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
A1	-	8	2	2	2	3	2	4	2	4	2	49	Significativo
A2	-	8	2	2	2	3	2	4	2	4	2	49	Significativo
A6	-	8	2	2	2	3	2	4	2	4	2	49	Significativo
A12	-	8	2	2	4	4	4	4	4	4	2	56	Significativo
A30	-	8	2	2	2	3	2	4	2	4	2	49	Significativo
A35	-	8	2	2	4	4	4	4	2	4	2	54	Significativo
A47	-	8	2	2	4	4	2	4	4	4	2	54	Significativo
A61	-	8	2	2	4	4	4	4	4	4	2	56	Significativo

### 5.3.1.2 Fabricación de Marcos de aluminio

Para la fabricación de los marcos de aluminio, la identificación de impactos ambientales relacionados a las entradas y salidas para cada proceso dio como resultado una cantidad de 35 impactos ambientales totales, de los cuales se obtuvo 7 impactos ambientales significativos. En el Anexo A2 se identifican la totalidad de los impactos ambientales. En la Tabla 5.24, se muestran los impactos ambientales significativos y en la Tabla 5.25, la valoración de importancia para cada impacto.

Tabla 5.26: Identificación de los impactos ambientales para la fabricación de marcos de aluminio.

ID	ETAPA	ACTIVIDAD O PROCESO	ASPECTO	IMPACTO
B3	FABRICACIÓN DE MARCOS DE ALUMINIO	PROCESO BAYERN	EMISIÓN DE MP10	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
B7			EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN GEI
B17		PROCESO DE HALL - HEROÚLT	EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
B18			EMISIÓN DE SO2	
B19			EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN GEI
B22			EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN GEI
B30		CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO	

Tabla 5.27: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la fabricación de marcos de aluminio.

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
B3	-	8	4	4	3	3	4	1	1	4	2	54	Significativo
B7	-	8	4	4	4	3	4	4	1	4	2	58	Significativo
B17	-	8	4	4	3	3	4	1	1	4	2	54	Significativo
B18	-	8	4	4	3	3	4	1	1	4	2	54	Significativo
B19	-	8	4	4	3	3	4	1	1	4	2	54	Significativo
B22	-	8	4	4	4	3	4	4	1	4	2	58	Significativo
B30	-	12	8	4	8	4	8	1	1	4	2	84	Significativo

### 5.3.1.3 Fabricación de EVA

Para la fabricación de film EVA, la identificación de impactos ambientales relacionados a las entradas y salidas para cada proceso dio como resultado una cantidad de 11 impactos ambientales totales, de los cuales se obtuvo 3 impactos ambientales significativos. En el Anexo A3 se identifican la totalidad de los impactos ambientales mientras que en la Tabla 5.26, se muestran los impactos ambientales significativos y en la Tabla 5.27, la valoración de importancia para cada impacto.

Tabla 5.28: Identificación de los impactos ambientales para la fabricación de film EVA.

ID	ETAPA	ACTIVIDAD O PROCESO	ASPECTO	IMPACTO
C1	FABRICACIÓN DE ETIL VINIL ACETATO (EVA)	POLIMERIZACIÓN	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
C2				FORMACIÓN DE GEI
C5			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO

Tabla 5.29: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la fabricación de film EVA.

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
C1	-	8	4	3	3	3	2	1	1	4	4	53	Significativo
C2	-	8	4	3	4	3	4	2	2	4	4	58	Significativo
C5	-	8	4	3	8	4	8	1	1	4	4	65	Significativo

### 5.3.1.4 Fabricación de Silicio de Grado Eléctrico

Para la fabricación de silicio de grado eléctrico, la identificación de impactos ambientales relacionados a las entradas y salidas para cada proceso dio como resultado una cantidad de 12 impactos ambientales totales, de los cuales se obtuvo 3 impactos ambientales significativos. En el Anexo A4 se identifican la totalidad de los impactos ambientales. En la Tabla 5.28, se muestran los impactos ambientales significativos y en la Tabla 5.29, la valoración de importancia para cada impacto.

Tabla 5.30: Identificación de los impactos ambientales para la fabricación de silicio de grado eléctrico.

ID	ETAPA	ACTIVIDAD O PROCESO	ASPECTO	IMPACTO
D8	FABRICACIÓN DE SILICIO DE GRADO ELÉCTRICO POLICRISTALINO	PROCESO DE SIEMENS	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
D9				FORMACIÓN DE GEI
D12			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO

Tabla 5.31: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la fabricación de silicio de grado eléctrico.

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
D8	-	8	4	3	3	3	3	1	2	4	2	53	Significativo
D9	-	8	4	3	4	3	4	4	2	4	2	58	Significativo
D12	-	8	4	4	8	4	8	1	1	4	4	66	Significativo

### 5.3.2 Producción de Paneles Solares Fotovoltaicos Policristalinos

Este subsistema al igual que en la estimación de emisiones contempló la etapa de fabricación de los paneles solares policristalinos a continuación, se identifican los impactos ambientales asociados.

Para la fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos, la identificación de impactos ambientales relacionados a las entradas y salidas para cada proceso dio como resultado una cantidad de 25 impactos ambientales totales, de los cuales se obtuvo 4 impactos ambientales significativos. En el Anexo A5 se identifican la totalidad de los impactos ambientales y como se observa en la Tabla 5.30, se muestran los impactos ambientales significativos y en la Tabla 5.31, la valoración de importancia para cada impacto.

Tabla 5.32: Identificación de los impactos ambientales para la fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos.

ID	ETAPA	ACTIVIDAD O PROCESO	ASPECTO	IMPACTO
E15	FABRICACIÓN DE PANELES SOLARES FOTVOLTAÍCOS POLICRISTALINOS	UNIÓN P-N	CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO
E21		ENCAPSULADO	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
E22				FORMACIÓN DE GEI
E25			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO

Tabla 5.33: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos.

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
E15	-	4	4	2	8	4	8	1	1	4	2	50	Significativo
E21	-	8	4	3	3	4	3	4	2	4	2	57	Significativo
E22	-	8	4	3	4	4	4	4	2	4	2	59	Significativo
E25	-	8	4	3	8	4	8	1	1	4	2	63	Significativo

### 5.3.3 Uso

Este subsistema al igual que en la estimación de emisiones contempló la etapa de mantenimiento de los paneles solares, ya que como se describió anteriormente en la puesta en marcha no generan emisiones relacionadas con los paneles solares en sí, quedando fuera de los límites del ACV, a continuación se muestran los resultados obtenidos sobre las emisiones, en lo que compete la mantención de los paneles solares, en donde se identificó una cantidad total de 11 impactos ambientales de los cuales ninguno resultado significativo. Estos impactos ambientales se muestran en la Tabla 5.32 y en la Tabla 5.33 se identificó la valoración de importancia de cada impacto ambiental.

Tabla 5.34: Identificación de los impactos ambientales para la etapa de uso de los paneles solares en específico la mantención de estos.

ID	ETAPA	ACTIVIDAD O PROCESO	ASPECTO	IMPACTO
F1	USO	MANTENCIÓN	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
F2				FORMACIÓN DE GEI
F3				ALTERACIÓN DEL SUELO
F4				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
F5			EMISIÓN DE CH4	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
F6				FORMACIÓN DE GEI
F7				DAÑO A LA SALUD HUMANA
F8			EMISIÓN DE N2O	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
F9				FORMACIÓN DE GEI
F10				DAÑO A LA SALUD HUMANA
F11			CONSUMO DIESEL	AGOTAMIENTO DEL RECURSO

Tabla 5.35: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en la etapa de uso específicamente en la mantención de paneles solares.

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
F1	-	4	1	2	3	3	2	1	2	4	2	33	No Significativo
F2	-	4	1	2	3	3	3	4	2	4	2	37	No Significativo
F3	-	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	20	No Significativo
F4	-	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	20	No Significativo
F5	-	2	1	2	3	3	2	1	2	4	2	27	No Significativo
F6	-	2	1	2	3	3	3	4	2	4	2	31	No Significativo
F7	-	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	17	No Significativo
F8	-	2	1	2	3	3	2	1	2	4	2	27	No Significativo
F9	-	2	1	2	3	3	3	4	2	4	2	31	No Significativo
F10	-	1	1	1	3	2	2	1	1	1	2	18	No Significativo
F11	-	2	1	1	8	4	8	1	1	4	2	37	No Significativo

### 5.3.4 Reciclaje

Este subsistema contempló los impactos ambientales asociados al reciclaje térmico de los paneles solares, en donde promedio de la identificación de entradas y salidas en la etapa anterior, fue posible la realización de la matriz de impactos ambientales. Esta matriz contempló una cantidad de 21 impactos ambientales totales de los cuales 6 dieron como resultado significativos. En el Anexo A6 se describen la totalidad de los impactos ambientales asociados a entradas y salidas mientras que en la Tabla 5.34 se muestran los impactos ambientales significativos y en la Tabla 5.35, la valoración de importancia para cada impacto.

Tabla 5.36: Identificación de los impactos ambientales para la etapa de reciclaje térmico de paneles solares.

ID	ETAPA	ACTIVIDAD O PROCESO	ASPECTO	IMPACTO	
D1	RECICLAJE DE PANELES SOLARES FOTVOLTAÍCOS POLICRISTALINOS	SEPARACIÓN MECÁNICA	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE	
D2				FORMACIÓN DE GEI	
D10		INCINERACIÓN	CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO	
D11		TRASLADO	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE	
D12				FORMACIÓN DE GEI	
D16				EMISIÓN DE CH4	FORMACIÓN DE GEI

Tabla 5.37: Valoración de criterios para la ponderación de importancia de los impactos ambientales en el reciclaje térmico de paneles solares.

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
D1	-	8	4	3	3	3	3	1	2	4	2	53	Significativo
D2	-	8	4	3	3	3	3	4	2	4	2	56	Significativo
D10	-	8	2	2	8	5	8	1	1	4	2	59	Significativo
D11	-	8	4	3	3	3	3	1	2	4	2	53	Significativo
D12	-	8	4	3	3	3	3	4	2	4	2	56	Significativo
D16	-	8	4	2	3	2	3	4	2	4	2	54	Significativo

# 6. DISCUSIÓN

## 6.1 Fase de Interpretación

### 6.1.1 Resumen y Discusión de Resultados

Lo primero que se destacó con la etapa de inventario del ACV que se realizó, son las emisiones producidas por cada fabricación de las materias primas del panel solar fotovoltaico policristalino, en donde para la fabricación del vidrio como se muestra en la Figura 6.1, la mayor variedad de contaminantes se produce en el proceso de fusión y flotado, a diferencia de las etapas de recocido, corte y templado en donde el principal contaminante es el CO<sub>2</sub>, la predominancia de este último contaminante es notoria en cada uno de los procesos.

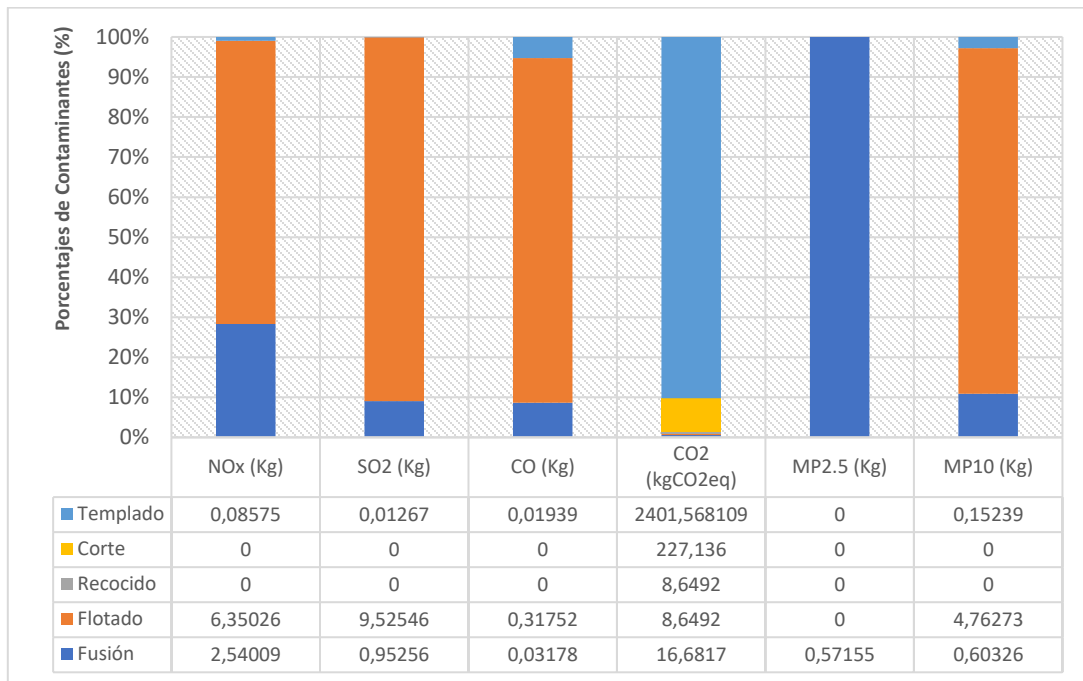


Figura 6.1: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de vidrio.

A través del análisis de inventario y la cuantificación de las emisiones se logró identificar una generación de emisiones de CO<sub>2</sub> alta en el proceso de fusión y en el proceso de templado, la diferencia radica en el tipo de energía utilizado en cada uno, la fusión con su ocupación de LNG logra llegar a 16,6817 kgCO<sub>2</sub>eq por cada tonelada de vidrio que produce, en cambio el templado llega a un valor de 2401,568109 kgCO<sub>2</sub>eq

valores que denotan una alta cantidad de emisión para CO<sub>2</sub>. Las emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y CO son bajas para los niveles de producción, marcando un precedente de que estos contaminantes se relacionan a la interacción de las materias primas del proceso, dejando de lado la ocupación de energía. El material particulado tanto 10 como 2,5 no registra emisiones altas para estos procesos siendo una emisión que se puede controlar con diferentes alternativas de mitigación.

La presencia de CO<sub>2</sub> en cada uno de los procesos, deja inmediatamente plasmado la relación de éste con la huella de carbono que produce la fabricación de vidrio templado, aumentando sus niveles, formulando una inquietud con respecto a este cálculo.

Al realizar la matriz de impactos ambientales relacionada a la fabricación de vidrio templado se obtuvo un total de 71 impactos ambientales de los cuales solo 8 dieron como resultado significativos. De éstos, aquellas emisiones que tienen la capacidad de generar impactos en la formación de GEI, todos fueron significativos, marcando la atención ante este tipo de impacto. Las emisiones que generan daño a la salud humana no obtuvieron una evaluación de grado significativo, por lo que se concluye que la fabricación de vidrio no tiene un gran impacto. Finalmente, los componentes de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> juegan un rol importante en cuanto a la alteración de la calidad del aire, pero se destaca que el valor obtenido en la valoración de la matriz de impactos ambientales está en el límite de la jerarquización para resultar significativo, concluyendo que, a pesar de obtener un grado de importancia mayor, una mínima gestión sobre estos tipos de impactos lograría disminuir su impacto ambiental.

La fabricación de marcos de aluminio dejó como resultados en la cuantificación de emisiones los porcentajes para cada contaminante presenten en la Figura 6.2.

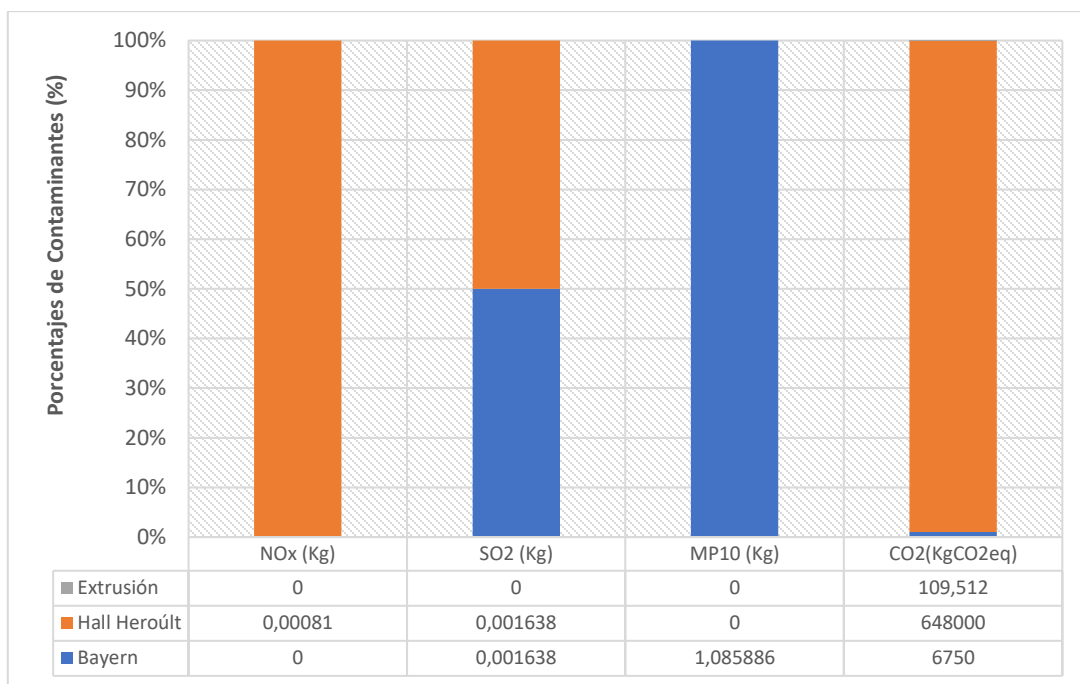


Figura 6.2: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de marcos de aluminio.

A través del gráfico se puede identificar la presencia de contaminantes solo en algunos de los procesos, esto debido a las materia primas ingresadas en cada uno de ellos, como también el tipo de operación unitaria que se realizó. En cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, la mayor parte de éstas se relacionan al proceso de Hall Heroúlt en donde las grandes cantidades de energía que se necesitan para poder llevar a cabo dicho proceso son muy altas, generando una cantidad de 648000 kgCO<sub>2eq</sub>. El proceso Bayern de igual manera genera grande emisiones de CO<sub>2</sub> generando un precedente que da la oportunidad de mejora para este proceso. Pero las emisiones tanto de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y MP<sub>10</sub>, sus valores no registran una cantidad tan significativa en comparación a las emisiones de CO<sub>2</sub>, en este sentido son emisiones mitigables, pero no tienen una distinción notoria para su disminución.

Lo que compete en la aplicación de la matriz de impactos ambientales, se obtuvo una cantidad total de 35 impactos ambientales, de ellos 8 fueron significativos en donde la mayor parte se relacionan con el impacto de alteración de calidad del aire, relacionados a las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub> debido a los procesos donde se identifican emisiones a pesar de no ser emisiones altas en cuanto a los dos primeros contaminantes mencionados anteriormente. La sinergia de estos puede provocar un mayor impacto por la calidad de aire, llevando su valoración a un nivel más alto. Como se mencionó anteriormente, las emisiones de CO<sub>2</sub> son altas, por eso es que tanto el impacto de alteración de aire como el de formación de GEI dan como resultado una jerarquización significativo concluyendo que estos procesos que contemplan este tipo de emisión son de importancia para poder aplicar medidas de mitigación. Se destaca el impacto

ambiental de agotamiento de recurso en el proceso de Hall – Heroúlt, por el uso de electricidad como fuente de energía para llevarse a cabo. Las altas cantidades que se necesitan demuestran que es un proceso que debe cambiar para poder contemplar a un menor impacto sobre el medioambiente. Finalmente, ninguno de los impactos relacionados con el daño a la salud humana, dio como resultado significativo, concluyendo que el impacto sobre el medioambiente de dichos procesos es mayor que sobre la salud humana.

En relación a la fabricación de film EVA, es un proceso bastante costoso, pero de una importancia enorme en la conformación de los paneles solares ya que este material cumple un rol de seguridad para la celda solar que es el principal material para la generación de energía, logrando de esta manera que la fabricación a pesar de su costo no cese. En cuanto a las emisiones provocadas por cada proceso en la fabricación de film EVA en la Figura 6.3, se aprecia los porcentajes de emisiones que genera cada proceso.

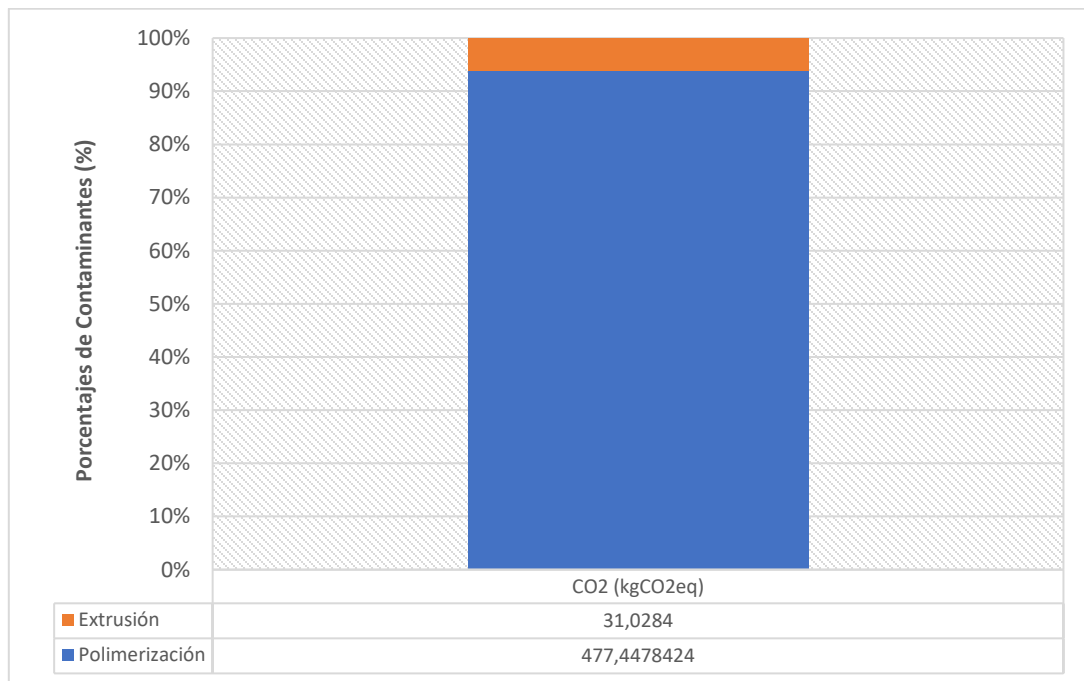


Figura 6.3: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de film EVA.

A través del gráfico, se puede evidenciar la predominancia del proceso de polimerización en cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub> ocupando un porcentaje de aproximadamente del 95%, denotando de esta manera que es el proceso con mayor generación de emisiones. La polimerización también contiene emisiones de etileno que no logra reaccionar con el Vinil Acetato, al considerar que hay un 100% de eficiencia del proceso, la recirculación de éste se logra recuperar en su totalidad, por lo que este flujo deja de ser una emisión, transformándose nuevamente en parte de la materia prima para la fabricación del producto. Nuevamente podemos presenciar la alta cantidad de energía que necesitan algunos procesos para llevar

a cabo sus funciones, dejando un ejemplo repetitivo en el cual debe existir algún cambio para la disminución del gasto energético y para poder disminuir la huella de carbono que se provoca.

La fabricación de este producto por otro lado es positiva, ya que la única emisión corresponde a CO<sub>2</sub> dejando fuera otros tipos de contaminantes como se vio en la fabricación de vidrio o aluminio, las emisiones provocadas por la interacción de materias primas es mínima, en su mayor parte corresponde al uso de energía.

La matriz de impactos ambientales relacionada a la fabricación de film EVA tuvo como resultados la identificación de 11 impactos ambientales de los cuales 3 fueron significativos, dentro de éstos se destacan las emisiones de CO<sub>2</sub> que provoca la alteración de la calidad de aire y la capacidad de generación de GEI, demostrando la importancia de esta emisión en cuanto a la huella de carbono. Otro impacto que se genera es el agotamiento del recurso para el proceso de polimerización. Por lo que para la minimización de dicho impacto se deben proporcionar alternativas para buscar un cambio en su jerarquización. Por otro lado, se destaca que los impactos identificados no tienen un daño significativo para la salud humana, flora, suelo y agua.

En la obtención de silicio de grado eléctrico policristalino, al identificar los flujos de entrada y salida se logró cuantificar las emisiones para la principal materia prima de un panel solar, las emisiones relacionadas a la fabricación de este producto se ven en la Figura 6.4 en donde se especifica el porcentaje de las emisiones para cada proceso.

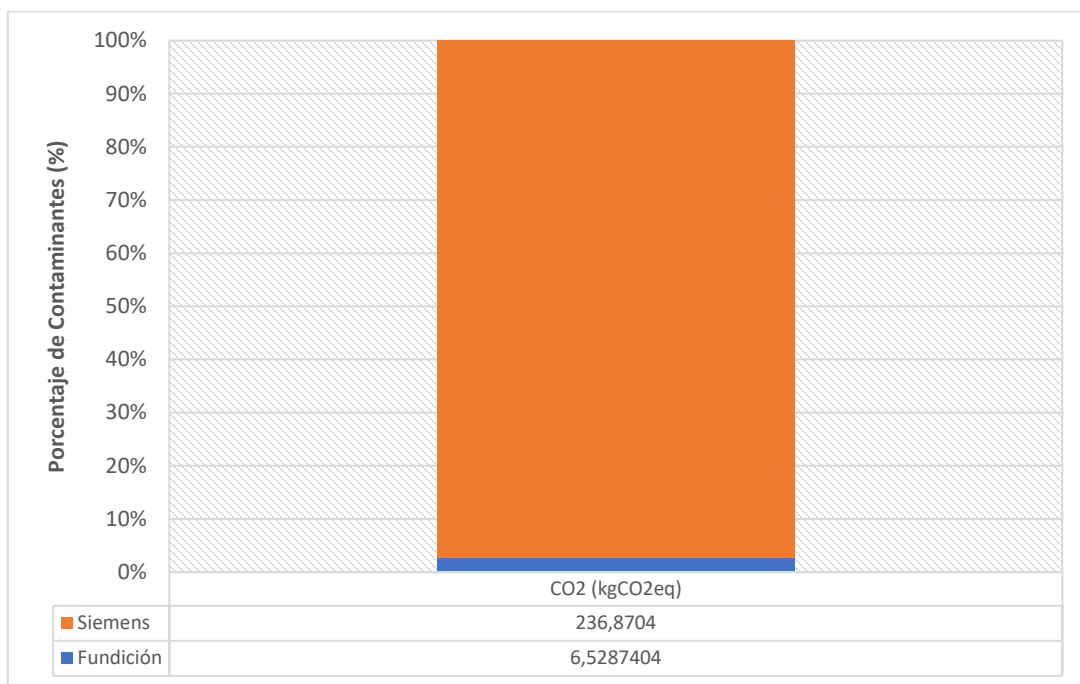


Figura 6.4: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de silicio de grado eléctrico policristalino.

A través del gráfico se puede evidenciar que la gran parte generadora de emisiones es el proceso de Siemens para obtener silicio policristalino, este proceso es exclusivo para dar la característica policristalina de la celda solar, tiene una ocupación de energía alta, llegando a sus 16000 kWh/ton de silicio policristalino. Más del 95% de las emisiones se relacionan a este proceso, pero no deja de ser esencial para obtener un producto más puro y que tenga una mejor generación de energía. Hoy en día este proceso a pesar de su antigüedad es de los más eficientes. Como se mencionó anteriormente, los paneles solares policristalinos ofrecen una mejor generación de energía para zonas de alta radiación solar, dejando como mejor opción la implementación de éstos en Chile. El proceso de Siemens económicamente no es alto, pero energéticamente destaca por sobre otros procesos para conseguir las principales materias primas de un panel solar. Al ser uno de los compuestos que se puede encontrar en gran cantidad de manera natural en la Tierra, tanto el proceso de fundición se realizan día a día con mayor frecuencia, influenciándose también por la demanda de paneles solares, a pesar de que la cantidad de emisiones para el proceso de fundición no es alta, puede seguir mejorando.

La matriz de impactos ambientales permitió identificar los impactos significativos en donde se obtuvo un total de 12 impactos y de ellos 3 significativos, como es tendencia en la fabricación de materias primas para los paneles solares, se vuelven a identificar las emisiones de CO<sub>2</sub> como aquella que significativamente afecta a la alteración de calidad de aire como también en la formación de GEI, demostrando también que

este dato apoya al aumento de la huella de carbono que se produce en la obtención de materias primas para un panel solar. El proceso de Siemens como se mencionó tiene un impacto ambiental significativo con el agotamiento del recurso, es decir que la utilización de energía eléctrica para llevar a cabo dicho proceso es alta, marcando una preocupación dentro de la matriz que debe obtener como respuesta aplicaciones de medidas de control en busca de la minimización de este impacto.

Ya con la obtención de todas las materias primas para la conformación de un panel solar fotovoltaico policristalino, se obtuvo la cuantificación de las emisiones para la fabricación de los paneles solares. Este procedimiento, demostró la ausencia de emisiones relacionadas al uso de materias primas, por lo que las emisiones se relacionaron al uso de energía para llevar a cabo cada uno de los procesos. En la Figura 6.5, se ven los porcentajes de emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas a cada etapa.

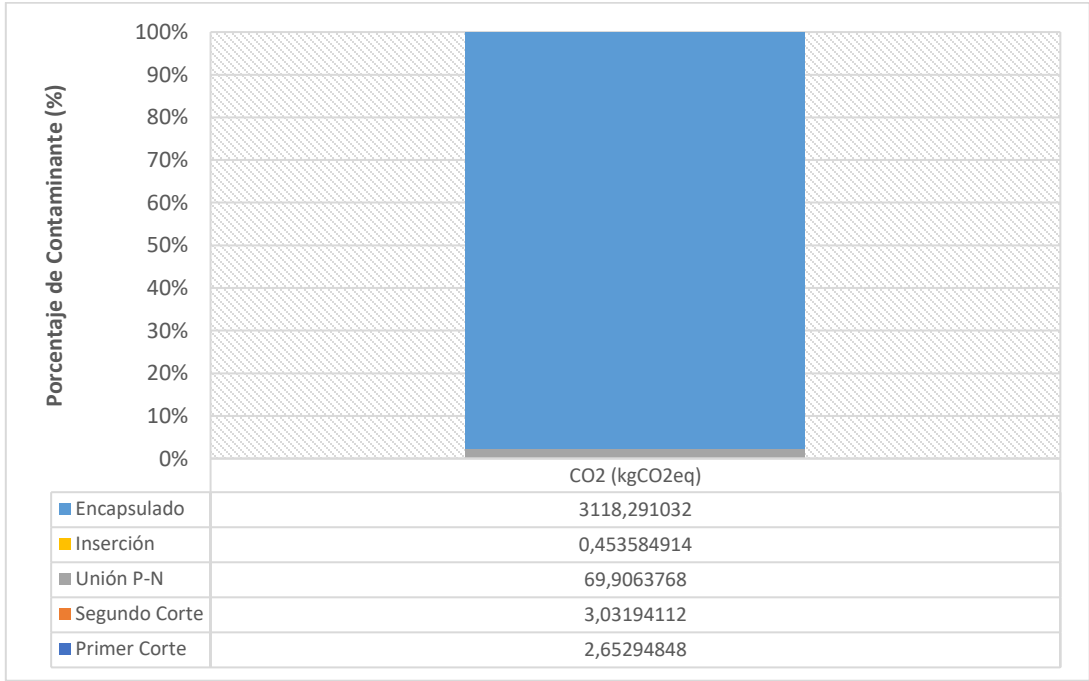


Figura 6.5: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos.

Como se puede presenciar en el gráfico, el proceso de encapsulado se lleva el mayor porcentaje de emisiones de CO<sub>2</sub> llegando casi a un 98%, el otro porcentaje restante se divide entre primer corte, segundo corte, inserción y el proceso de Unión P-N siendo este último el que mayor presencia tiene. Los procesos que tienen una menor emisión radican principalmente en la rapidez con la que se llevan a cabo de no más de una hora, esto facilita la emisión obteniendo menores cantidades en comparación a los demás

procesos. El encapsulado tiene una utilización de energía elevada en comparación con los demás procesos, ya que éste necesita llegar a temperaturas que logren un buen encapsulado al vacío del EVA.

La matriz de impactos ambientales para la fabricación de paneles solares consta con 25 impactos totales y de los cuales 4 son significativos, nuevamente se evidencian las emisiones de CO<sub>2</sub> como las principales razones de impactos significativos en el proceso de Encapsulado, como también el consumo eléctrico y el impacto de agotamiento del recurso en los procesos de Unión P-N y encapsulado. Este último proceso obtuvo una valoración mayor en comparación a la de Unión P-N que está con un valor cercano a la jerarquización no significativa, sin embargo, al comparar con los demás procesos, éstos se llevan el mayor porcentaje de emisiones de CO<sub>2</sub> y utilización de energía.

La etapa de uso, como se mencionó al definir los límites y el alcance contempla el transporte del personal para la realización de mantenencias a los paneles solares, debido que el funcionamiento de una planta solar fotovoltaica no produce emisiones por parte de los paneles solares al generar energía. Las mantenencias de los paneles solares se realizan en un rango de 1 vez por semana o 1 vez por mes, en donde inmediatamente se puede inferir que las emisiones para el transporte son bajas, las mantenencias no tienen un mayor efecto ambiental ya que éstas son solo de quitar suciedad que pueda interferir en la penetración de la radiación solar, incluso se menciona en documentos oficiales de que la mejor mantención de un panel solar es dejar que este funcione tranquilamente sin una manipulación humana que haga correr el riesgo de la quebradura de una celda solar, ya que al producirse esto, la eficiencia baja inmediatamente y por consecuencia menor cantidad de energía es capaz de generar. En la Figura 6.6 se ven las emisiones producidas por el transporte del personal al realizar la mantención de los paneles.

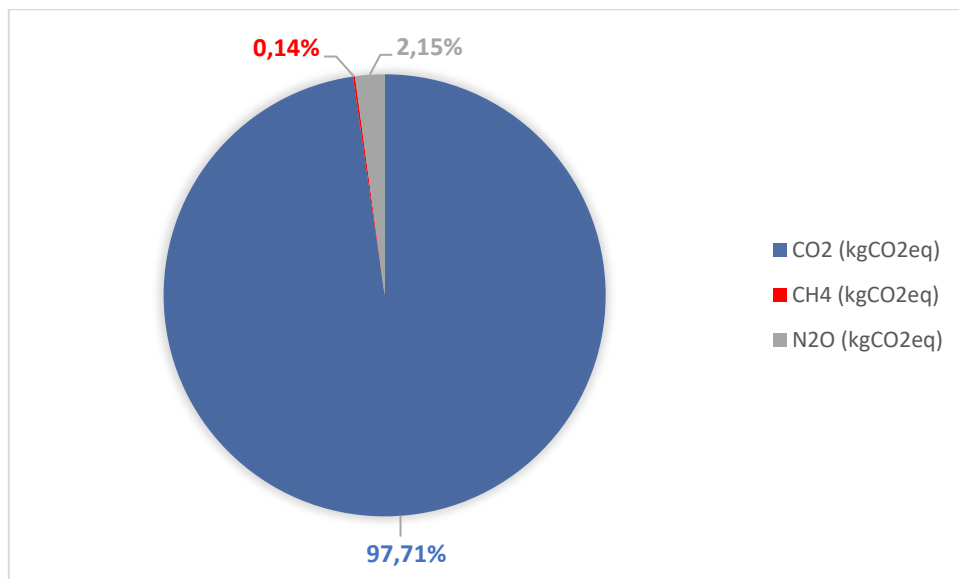


Figura 6.6: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso de la fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos.

Como se aprecia en el gráfico de torta la mayor parte de emisiones son relacionadas al CO<sub>2</sub>, seguido por el N<sub>2</sub>O y finalmente el CH<sub>4</sub>, cada una de estas emisiones calificadas como GEI, generando una relación directa con la huella de carbono que se puede producir.

Para la matriz de impactos ambientales asociado al uso específicamente en el proceso de mantención de los paneles solares, se logró obtener una cantidad de 11 impactos ambientales totales y 0 de estos es significativo, lo cual da un indicio muy positivo para la implementación de este tipo de energía en Chile. Por lo que, el reciclaje de los paneles solares, pueden ser sometidos a una técnica de reciclaje térmico ya que este en Chile se puede realizar y que debido que para el reciclaje químico no existen plantas. Este tipo de reciclaje tiene beneficios, ya que solo contempla emisiones de CO<sub>2</sub>, pero el traslado de los paneles solares a un punto donde pueda ocurrir este proceso emite otros tipos de GEI. En la Figura 6.7, se logra ver qué porcentaje dentro de las emisiones totales ocupa para cada contaminante

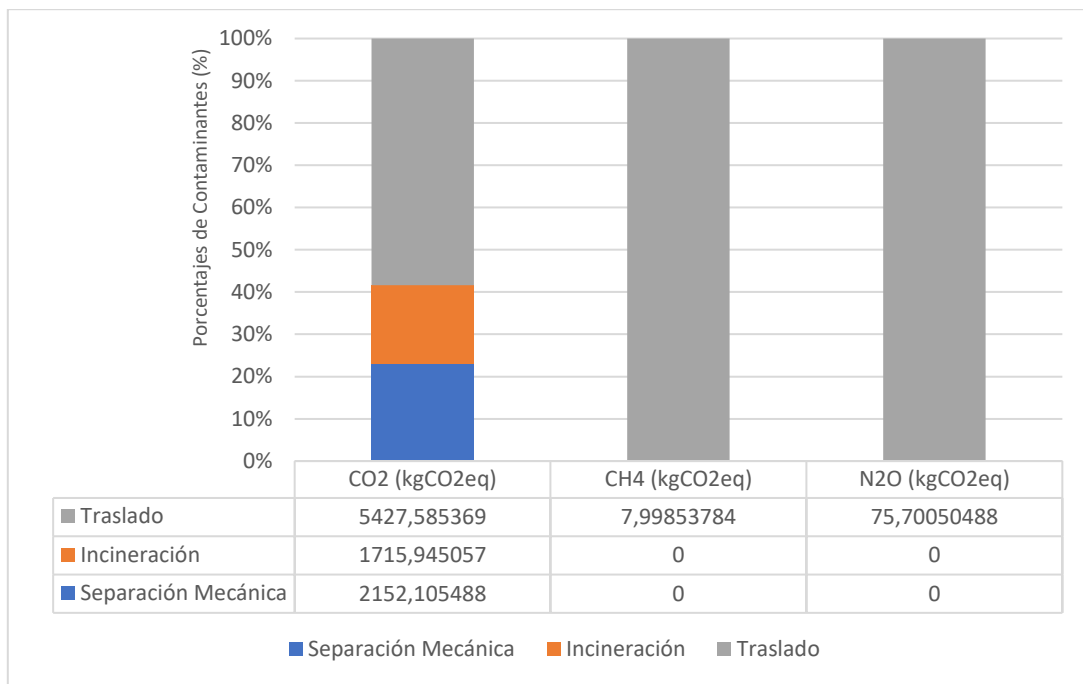


Figura 6.7: Porcentajes de contaminantes encontrados en cada proceso del reciclaje térmico de paneles solares.

Como se puede ver en el gráfico, en relación a las emisiones de CO<sub>2</sub>, se tiene la presencia de 3 procesos en donde el mayor porcentaje lo tiene el traslado de estos paneles solares, si bien la unidad funcional definida es 1000 kg de panel solar que equivale al peso de 1 unidad de éste, el reciclaje contempla una mayor cantidad por lo que la utilización del traslado es mayor. Este porcentaje llega aproximadamente a un 55%, quedando el proceso en sí de reciclaje con un menor porcentaje de emisiones. Para los contaminantes de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O solamente se relacionan con el traslado por el uso de Diesel como entrada de energía.

La matriz de impactos ambientales para el reciclaje de los paneles solares tiene un total de 21 impactos totales, de los cuales 6 tienen una jerarquización de significativo. De éstos la mayor parte es relacionado a las emisiones de CO<sub>2</sub> y su capacidad de alteración de calidad de aire y formación de GEI, en donde a pesar de tener el reciclaje un carácter positivo éste incluso puede provocar una aumento en el nivel de huella de carbono debido a la emisión de CO<sub>2</sub>. Otro impacto que se destaca también es la formación de GEI, pero por parte del CH<sub>4</sub>, este contaminante tiene una influencia dañina mayor que las emisiones de CO<sub>2</sub>, por lo que su significancia marca un precedente para poder minimizar el impacto que provoca. Finalmente mencionar la ocupación de energía eléctrica para el proceso de incineración también dio como resultado una jerarquización significativo, a pesar de que no se necesita una elevada temperatura ya que se busca el punto de sublimación del EVA que es de 180°C, pero para éste se necesita una cantidad de energía elevada por lo que se considera como un proceso con mayor gasto energético.

La cuantificación de cada etapa y proceso que se lleva a cabo para la obtención de paneles solares y las etapas de uso y reciclaje permiten aplicar una perspectiva que la metodología de ACV deja entrever la identificación de aquellos procesos con una mayor emisión o daño ambiental. En la tabla 6.1 se muestran las cuantificaciones de emisión para este estudio.

Tabla 6.1: Emisiones totales de ACV para los paneles solares fotovoltaicos policristalinos

SUBSISTEMA	CONTAMINANTES							
	CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2eq</sub> )	CO (kg)	NO <sub>x</sub> (kg)	SO <sub>2</sub> (kg)	MP <sub>2,5</sub> (kg)	MP <sub>10</sub> (kg)	CH <sub>4</sub> (kgCO <sub>2eq</sub> )	N <sub>2</sub> O (kgCO <sub>2eq</sub> )
VIDRIO TEMPLADO	2662,6842	0,36869	8,9761	10,49069	0,5716	5,5184	0	0
MARCOS DE ALUMINIO	654859,51	0	0,00081	0,003276	0	1,0859	0	0
FILM EVA	508,4762	0	0	0	0	0	0	0
SILICIO DE GRADO ELÉCTRICO	243,3991	0	0	0	0	0	0	0
PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO	3194,3359	0	0	0	0	0	0	0
USO	14,9372	0	0	0	0	0	0,02187	0,3281
RECICLAJE	9295,6359	0	0	0	0	0	7,9985	75,7005

Como se evidencia en la tabla anterior, el proceso con una mayor variedad de emisiones es la fabricación de vidrio templado, esta variedad de emisiones puede provocar un efecto acumulativo en diferentes impactos ambientales por lo que debe existir una preocupación y atención para formular medidas de control a este proceso, siendo necesario implementar nuevas tecnologías, alternativas de abatimiento de emisiones o incluso el cambio de fuentes de energía para llevar a cabo sus procesos. La fabricación de aluminio tiene la mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, seguida del proceso de reciclaje. Si vemos las otras emisiones de los demás contaminantes no llegan a los valores que se obtienen de CO<sub>2</sub>. De esta manera se infiere que su huella de carbono en caso de utilizar dichos valores obtenidos puede llegar a ser elevada, llegando a 797148,381 kgCO<sub>2eq</sub>.

Al comparar los impactos ambientales provocados por cada subsistema designado, éstos demuestran diferencias notorias, en la Tabla 6.2, se puede ver el resumen total de todas las matrices de impactos ambientales realizadas.

Tabla 6.2: Tabla resumen de impactos ambientales identificados.

SUBSISTEMA	Nº DE IMPACTOS TOTALES	Nº DE IMPACTOS SIGNIFICATIVOS
VIDRIO TEMPLADO	71	8
MARCOS DE ALUMINIO	35	7
FILM EVA	11	3
SILICIO DE GRADO ELÉCTRICO POLICRISTALINO	12	3
PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO	25	4
USO	11	0
RECICLAJE	21	4

Como se puede apreciar, el subsistema con mayor cantidad de impactos ambientales identificado es la fabricación de vidrio templado, seguido de la fabricación de marcos de aluminio, ambos han sido destacados anteriormente como aquellos que mayor cantidad de emisiones tienen y mayor variedad de contaminantes implican. Si bien la fabricación de vidrio templado contempla una cantidad de 71 totales de estos solo 8 son significativos, poniendo más atención en éstos que en los restantes. Aquel impacto más repetitivo es la generación de GEI por parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> presente en cada matriz. Por otro lado, aquellos procesos que implican una gran cantidad de energía a utilizar provocando el impacto de agotamiento del recurso, todos logran obtener una jerarquización de significativo. Estos dos impactos demuestran la atención que se debe tener para minimizar su impacto, buscando alternativas que ayuden en gran medida.

Como se logró identificar luego de la realización de ambas etapas de ACV, se mencionan recirculaciones o emisiones de gases y residuos sólidos producidas en algunos procesos, estas no se toman en cuenta en la matriz de impactos ambientales ya que muchos pasan a ser materias primas o subproductos para diferentes fabricaciones de productos, al contemplar un 100% de eficiencia de los procesos, lo que entra en cuanto a materia es igual a lo que sale. Uno de estos subproductos es el humo de sílice, éste se emite en el proceso de obtención de silicio de grado eléctrico y se utiliza para la formación de hormigón, cumpliendo una función de otorgar mayor resistencia a este tipo de material, por lo que a pesar de ser un flujo de salida en este ACV y determinado como emisión, no conforma un mayor impacto ambiental muy por al contrario conforma parte importante del ámbito económico para este proceso y lo hace menos costoso ya que este subproducto se vende por aquellas empresas que realizan la fabricación de silicio de

grado eléctrico. En este mismo tipo de fabricación también tendremos residuos sólidos que se refiere a impurezas contenidas en el cuarzo que pueden ser litio, aluminio, sodio, potasio, hierro o titanio. Estas impurezas catalogadas de esta manera por la nula participación que tiene en la conformación de silicio, también se pueden determinar para subproductos o materias primas para otros procesos, por lo que su impacto ambiental también es nulo siempre y cuando se aprovechen. En este caso es de esta manera que se utiliza como venta para obtener también una compensación económica.

También tenemos recirculaciones en la fabricación de marcos de aluminio y film EVA, lejía de sosa y etileno que no reacciona respectivamente, ambos flujos se logran recircular como parte de los procesos para un mayor aprovechamiento de las materias primas que se introducen, estas alternativas hace que ambos procesos sean mucho más eficientes, generando una menor cantidad de emisiones de las cuales deba existir algún tipo de mitigación influyendo en ámbitos económicos, ambientales e incluso sociales planteando modelos de procesos que conforman parte del desarrollo sostenible, este último término va de la mano con la implementación de energías renovables. Por lo que si en la obtención de materias primas para la fabricación de paneles solares se logra generar un proceso con objetivos eficientes en cuanto a energía y disminución del impacto ambiental complementan la implementación de energías renovables y limpias cumpliendo a cabalidad este último concepto mencionado.

### **6.1.2 Recomendaciones**

Existen grandes medidas de recomendaciones para los procesos analizados tanto en la fabricación de materias primas de los paneles solares, la producción de éstos e incluso el uso y reciclaje. Cada una de estas recomendaciones buscan la mejora de emisiones y efectividad en disminuir la huella de carbono, ya que se identificó como una alternativa para plasmar importancia en ella, fomentar de esta manera, un cambio pequeño en procesos o materias primas a utilizar, generando un gran cambio ambiental para la implementación de la energía solar como gran alternativa a la disminución de kg de CO<sub>2</sub> en Chile. Una alternativa para la disminución de GEI es adoptar medidas para la eficiencia en términos de energía, emplear combustibles de bajo contenido en carbono.

Primero se proponen recomendaciones para la fabricación de vidrio, un área de éstas es el proceso de fusión en donde como se mencionó anteriormente, existe una gran variedad de contaminantes. Para esto una alternativa es el estudio del peso del vidrio que se quiere obtener, al tener un menor peso del vidrio provocaría un menor tiempo de uso del horno de fusión disminuyendo emisiones, en un panel solar fotovoltaico policristalino conforma la mayor parte llegando a los 700 kg, este peso se puede reducir

obteniendo un vidrio de características similares, pero con menor peso logrando un proceso más efectivo en cuanto a la ocupación de energía como también en la generación de emisiones.

El material particulado provocado también es un caso que se debe mitigar, ya que puede producir problemas en los trabajadores de las plantas de fabricación, producto de que las materias primas entran como polvo o material granulado, humidificar la mezcla de materias primas puede reducir en gran parte las emisiones, ya sea con agua o soluciones alcalinas tales como hidróxido o carbonato sódicos.

Las emisiones de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  se pueden reducir cambiando el tipo de combustible utilizado, el gas natural puede ayudar de gran medida en la disminución de estas emisiones. Finalmente, promover el uso de vidrio reciclado como materia prima subiendo su porcentaje de 4% que es la utilización cotidiana hoy en día ayuda no solamente a implementar el reciclaje de este producto, sino que también a reducir impacto ambiental y generación de residuos que no tienen un destino claro.

De esta manera se puede reducir en gran parte las emisiones y ayudar como medidas de control para la reducción de significancia de los impactos ambientales. En cada proceso se puede aplicar alguna alternativa de las que se mencionó siendo éstas eficientes para el objetivo de reducir las emisiones, la huella de carbono y mitigar los impactos ambientales.

Para la fabricación de aluminio también tenemos una gran implicancia en las emisiones de  $\text{CO}_2$ , estas nuevamente influencia negativamente en la formación de GEI, el uso de energía en el proceso de Hall Heróult, es bastante alta en comparación con los demás procesos de obtención de materias primas por lo que aquí hay que aplicar medidas de mitigación tales como buscar alternativas reductoras de energía optar por energías renovables y provocar un cambio en la matriz energética sería de gran ayuda implica novedad y un cambio de paradigma para la fabricación de este producto, por otro lado optimizar los tiempos de elaboración de este producto reduce la emisión y gasto energético. Y tomando una recomendación más drástica dado que las características que este material da a un panel solar es de soporte y seguridad, quitarlo en cuanto a la conformación e implementar alternativas como marcos de plásticos reciclado dando un uso ambiental efectivo que pueda otorgar las mismas características necesarias sería un gran cambio, si bien drástico, pero ayuda indirectamente incluso a otros problemas ambientales.

Las emisiones de material particulado en la fabricación de marcos de aluminio solo ocurre en el proceso de Bayern para disminuir esto es mucho mejor trabajar con una mezcla húmeda si bien ahora existirá un gasto de agua al ocupar esta recomendación un proceso de recirculación y tratamiento de aguas residuales

puede ayudar a completar un proceso ambiental eficiente. Incluso utilizar el vapor generado por las emisiones gaseosas ayuda de gran manera en reducir las emisiones provocadas y facilitar un residuo como recirculación.

La fabricación de Film EVA tiene como falencia la ocupación de una gran cantidad de energía en el proceso de polimerización, debido a la búsqueda de las mejores condiciones para la obtención de un producto con gran porcentaje de Vinil Acetato. Para esto la aplicación de nuevas tecnologías en búsqueda de disminuir el gasto energético es esencial, reactores capaces de obtener mejores condiciones de presión y de temperatura podrán ayudar a la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>, ocupación de menos energía eléctrica ya que tendrán una efectividad más eficiente y de esta manera minimizar la huella de carbono. La producción de Film EVA no es constante ni se realiza a gran escala, este producto tiene el beneficio de poder obtener grandes cantidades al completar un ciclo de proceso lo cual en la conformación de un panel solar logra sacar grandes cantidades para la producción de paneles solares.

El proceso de extrusión se realiza en tan solo dos fabricaciones, éstas son en marcos de aluminio y film EVA, a pesar del bajo consumo energético y baja emisión de CO<sub>2</sub> igual se puede realizar una recomendación de mejora para este proceso, cambios en el motor de las extrusoras con los avances que existen en esta materia, ayudan a obtener un gran rendimiento con poco consumo; las dimensiones a utilizar de la extrusora también debe estar acorde al tamaño del producto que se desea obtener para obtener el mayor aprovechamiento de las fases de este proceso; la presión gas comprimido que se utiliza para poder enfriar el producto es un arista que puede mejorar el uso energético, una mayor regulación en esta variable puede modificar el uso energético y emisiones.

Para la fabricación de paneles solares su principal materia prima es el silicio de grado eléctrico en este caso del tipo policristalino. El proceso de Siemens es donde existe una mayor carga de consumo energético, este proceso se realiza hace más de 30 años y al día de hoy no existe otro tipo para obtener silicio policristalino de alta eficiencia, a pesar de que se ha tratado de buscar nuevas tecnologías no se logran obtener los mismos porcentajes de eficiencia, por lo que la recomendación para el menor consumo energético se produzca es buscar optimizar el tiempo de producción e incluso llevar a cabo procesos combinados tales como lo son el Czochralski por el cual se obtiene silicio monocristalino y que energéticamente hablando tiene un menor consumo.

El proceso de producción de un panel solar fotovoltaico policristalino tiene un menor impacto y emisiones que no son altas en comparación con los procesos anteriores, esta etapa es bastante tecnológica utilizando equipamiento de alta gama, logrando mitigar emisiones y hacer un proceso que no provoque un mayor impacto ambiental. La recomendación principal para este proceso es que la utilización de energía eléctrica es la principal, cambiar este tipo de energía utilizando una fuente de energía renovable sería ideal fomentando el concepto de la conformación de un producto que ayudara a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> y que a la vez se realiza en un proceso que ocupa una fuente de energía renovable.

En las etapas de uso y reciclaje tiene un potencial para la implementación de planes de gestión excepcionales que afrontarán problemas ambientales que se puedan provocar en un futuro. La implementación de paneles solares en un área física debe ser análisis de estudio previo. Realizar un estudio de impacto ambiental previo a la conformación de una planta solar fotovoltaica demuestra responsabilidad ambiental por parte del ejecutor del proyecto y que venga de la mano de un plan de logística que permita la menor emisión de contaminantes, lo que marca una diferencia al realizar un cambio de energía en Chile. Por otra parte, el reciclaje de los paneles solares en Chile aún no se considera a gran escala, la vida útil de cada panel solar se calcula en alrededor de 20 – 25 años. Como se identificó anteriormente de éstos se obtiene vidrio templado, marcos de aluminio y celdas solares que pueden reutilizarse, nuevamente en la conformación de un nuevo panel solar, proyectando el concepto de economía circular y así se completa un ciclo de vida de este producto de manera eficiente y con la menor carga ambiental posible, disminuyendo pasivos ambientales. Cabe destacar que la reutilización de las celdas solares puede ser de 4 veces, del vidrio templado en caso de no estar afectado de alguna manera la cantidad de veces que se necesite y en el caso de estar con una rotura se puede ocupar como vidrio reciclado en la fabricación de vidrio templado y para los marcos de aluminio se puede hacer el mismo procedimiento.

Finalmente recomendar el uso de equipos de abatimiento para cada proceso puede conllevar a un gasto económico mayor pero que al comparar con las emisiones que se disminuyen lo hacen una opción rentable a través del tiempo. Estos equipos de abatimiento para los procesos descritos pueden ser, colectores de polvo, filtros de mangas, precipitador electrostático seco, scrubber húmedo o Venturi en el caso de las emisiones de MP y para las emisiones gaseosas torres de absorción, precalentamiento de cullet y scrubber húmedo como también el cambio de combustibles a equipos con menor generación de GEI.

## 7. CONCLUSIÓN

El Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de gestión permite un valioso estudio de los procesos de un producto, que no solo deja ver las falencias, sino también aquellos procesos que se realizan de buena manera. La oportunidad que deja para mejorar la gestión en cuanto a todo el proceso por el cual pasa algún producto hace que sea una herramienta completa. Si se compara la utilización de ACV como herramienta para la cuantificación de emisiones y la huella de carbono, el análisis de ciclo de vida deja en evidencia no solo las emisiones de GEI, sino que también otras que pueden ser complementarias para poder discutir, recomendar soluciones y concluir sobre impactos ambientales que puedan provocar.

El estudio realizado sobre los paneles solares fotovoltaicos policristalinos dejó en evidencia procesos y etapas donde hay que poner atención para fomentar la implementación de este tipo de energía en Chile de forma correcta y completa, no solo con el beneficio de cambiar la matriz energética del país a uso de energías renovables, sino que también, desde la etapa de obtención de materias primas, fabricación de paneles solares. El uso y reciclaje de éstos contempló una alternativa ambiental, social y económica que puede llegar a un desarrollo sostenible en el avance de energías. El potencial que tiene Chile para la implementación de energía solar es gigante y se puede ver más potenciado con el estudio realizado por profesionales previo a la implementación.

Confiados del avance tecnológico que se provee año tras año sobre paneles solares, el cambio de algunos materiales que conforman parte del panel solar puede generar una gran alternativa para la disminución de emisiones e impactos ambientales producido por algunos procesos que aumentan dichas aristas.

Finalmente, al comparar la cantidad de CO<sub>2</sub> generado por las energías no renovables que tienen un promedio de 0,3834 kg/kWh al generar energía y el ciclo completo de un panel solar fotovoltaico policristalino que tiene un promedio de 600000 kg/kWh, sigue siendo mejor la implementación de energía solar en el país, en busca de cumplir los objetivos propuestos sobre carbono neutralidad, ratificando así la efectividad de cero emisiones que se provocan por el uso de este tipo de energías. La realización de cada etapa de ACV confirma esta aseveración, pero se puede seguir mejorando.

## 8. REFERENCIAS

- Asociación Chilena de Seguridad. (2000). Fabricación de vidrio y de productos de vidrio. En Guía para el control y prevención de la contaminación industrial (págs. 8 - 12). Santiago: Comisión Nacional del medioambiente.
- Barlow, A. (1991). The Chemistry of Polyethylene Insulation. IEEE Electrical Insulation Magazine: 8-19.
- Bouzguenda, M., Gastli, A., Masmoudi, A., & Salmi, A. (2012). Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell. En International Journal of Renewable Energy Research (pág. 2).
- Burns, B. (21 de Noviembre de 2011). Atlantic Cable. Obtenido de <https://atlantic-cable.com/CablePioneers/Smith/index.htm>
- Camacho, J. A. (2017). Capítulo 1: Proceso de producción del EVA. En Estudio termodinámico del proceso de separación de copolímero de Etilo Vinil Acetato (EVA) (págs. 4-5). Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Castillejo, A., Escobar, R., García, M., García, R., Mata, C., Simsek, Y., & Zurita, A. (2018). State of the art and prospects for solar PV development in Chile. En Renewable and Sustainable Energy Reviews (págs. 701-727).
- Comité Solar Chile. (2019). Estudio Benchmarking de Plantas Solares Fotovoltaicas en Chile. Santiago: Encare.
- CONAMA. (2009). Emisiones Fijas Móviles.
- Duque, J., & Ramirez, Á. (2006). En uso de metodología de evaluación ambiental de ciclo de vida para productos: Aplicación a baterías de arranque automotor. Guayaquil.
- Enercer. (2019). Historia Energía Solar. Evolución Tecnológica de los Paneles Solares Fotovoltaicos, (págs. 2-10). Bogotá.
- Energía, M. d. (2017). Chile Sustentable. En Termoeléctricas a Carbón en Chile (págs. 8 - 9). Santiago: Programa Chile Sustentable.
- Energías Renovables. (25 de Noviembre de 2014). Energías Renovables Info. Recuperado el 15 de Noviembre de 2020, de <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>
- EPA, U. (2020). Compilation of Air Pollutant Emission Factors. AP-42.
- Espíndola, C., & Valderrama, J. (2011). Huella de Carbono, un Concepto que no puede estar Ausente en Cursos de Ingeniería y Ciencias. Formación Universitaria, 3-12.
- FAO. (2008). Reemplazo o reducción del uso de bromuro de metilo como medida fitosanitaria. Recomendación de la CIPF. En Informe de la tercera reunión de la Comisión de Medidas Fitosanitarias. Roma: CIPF.

- Fedesarrollo. (2010). El Impacto de la crisis petrolera mundial. Medellín: Coyuntura Económica.
- Fernández, E. (2007). Archivos y Normas iso. Madrid: TREA.
- Gálvez, V. (2009). Capítulo 2: Etil Vinil Acetato. En Sustitución de piezas metálicas por piezas plásticas (pág. 12). Saltillo: Centro de investigación en química aplicada.
- Generadoras de Chile. (28 de Noviembre de 2020). Generación eléctrica en Chile.
- Generadoras de Chile. (14 de Mayo de 2019). Generación eléctrica en Chile. Recuperado el 12 de Noviembre de 2020, de Generadoras de Chile: <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>
- Guzmán, C. (2017). En Análisis del impacto ambiental de diferentes tipos de paneles solares (págs. 32-34). Bogotá: UAmerica.
- Hertwich, E., & Peters, P. (2009). Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis. En Environmental Science & Technology (págs. 6414-6420).
- ISO. (2006). Environmental management. Life cycle assessment. ISO. (Noviembre de 2006). ISO 14040:2006. Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia. Recuperado el 20 de Noviembre de 2020, de <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Jeyraj, A., Rahim, V., Rahim N, Selvaraj, L., & Tyagi, V. (2013). Progress in solar PV technology: Research and achievement. En Elsevier, Renewable & Sustainable Energy Reviews (págs. 443-461). Haryana: Board.
- Lopéz, A. (14 de Diciembre de 2014). Sacyr. Obtenido de <https://www.sacyr.com/-/charles-fritts-el-desconocido-inventor-de-los-paneles-solares#tungsteno>
- Lucas, A. (2018). Cambio climático e instrumentos económicos: propuestas de regulación jurídica. Universitas, 137.
- Martí, M. C. (2002). Principios de ecotoxicología. Madrid: Tébar. (págs. 12-20).
- Ministerio de Energía. (2019). Energía 2050, Política energética de Chile. Santiago: Gobierno de Chile.
- Ministerio de Energía (2012). Ley de Generación Ciudadana. Santiago: Gobierno de Chile.
- Ministerio de Medioambiente (2019). Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles. Santiago: Gobierno de Chile
- MITECO. (Junio de 2020). Sistema Español de Inventario de Emisiones. Recuperado el 18 de Noviembre de 2020, de [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/040301-fabric-aluminio\\_tcm30-502319.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/040301-fabric-aluminio_tcm30-502319.pdf)
- Morales, A., & Palacios, J. (2017). Productividad de paneles solares monocristalinos (págs. 1-2). Santiago: Congreso Anual de la Somim.
- Policies Stated. (2020). World Energy Outlook. Paris: IEA.

- Reyes, A. (11 de Mayo de 2018). Recuperado el 17 de Noviembre de 2020, de Universidad de Santiago de Chile: <https://www.usach.cl/news/gran-aporte-investigador-la-universidad-sector-agroalimentario>
- Romero, J. (2019). Análisis de Ciclo de Vida. En Análisis ciclo de vida y económico aplicado a la reutilización de paneles solares fotovoltaicos (págs. 18-20). Santiago.
- Samaniego, J., & Schneider, H. (2009). La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. En Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Sherwani, A., & Usmani, J. (2010). Life cycle assessment of solar pv based electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 540-544.
- Tesla Energy. (2017). Tesla Energy Proyectos de Energía Solar. Recuperado el 10 de Noviembre de 2020, de <https://teslaenergy.cl/paneles-solares-lo-que-necesita-saber-y-mas/>
- TRITEC. (18 de Agosto de 2017). Tipos de paneles solares fotovoltaicos. Recuperado el 16 de Noviembre de 2020, de <https://tritec-intervento.cl/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>
- US, E. (1985). Equipo pesado, Vol II. Compilation of Air Pollutants Emission Factors AP-42. Vol II Mobile Sources.
- Valdés, M., & Watts, D. (2012). Wind & Solar Conference. Proyectos fotovoltaicos en Chile y Generación Distribuida, (págs. 4-5).
- Weckend, S., & Wade, A. (2016). En End of the life management solar photovoltaic panels (págs. 41-43). IRENA.
- Wiedmann, T. (2009). Economic Systems Researc. En Carbon Footprint and Input-Output Analysis - An Introduction (págs. 175-186).
- World Auto Steel. (25 de Enero de 2019). Steel industry provides improved tools to contribute to sustainable automotive. Recuperado el 10 de Noviembre de 2020, de <https://www.worldautosteel.org/life-cycle-thinking/>

## 9.Anexos

Anexo A1: Matriz impactos ambientales vidrio templado

ID	SUBSISTEMA	ETAPA	ASPECTO	IMPACTO
A1	FABRICACIÓN DE VIDRIO TEMPLADO	FUSIÓN	EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
A2			EMISIÓN DE SO2	
A3			EMISIÓN DE CO	
A4			EMISIÓN DE MP2,5	
A5			EMISIÓN DE MP10	
A6			EMISIÓN DE CO2	
A7			EMISIÓN DE NOx	DAÑO A LA SALUD HUMANA
A8			EMISIÓN DE SO2	
A9			EMISIÓN DE CO	
A10			EMISIÓN DE MP2,5	
A11			EMISIÓN DE MP10	
A12			EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN DE GEI
A13			EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN DEL SUELO
A14			EMISIÓN DE SO2	
A15			EMISIÓN DE CO2	
A16			EMISIÓN DE MP2,5	
A17			EMISIÓN DE MP10	
A18			EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
A19			EMISIÓN DE MP2,5	
A20			EMISIÓN DE MP10	
A21			EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN FLORA

Anexo A1: Matriz impactos ambientales vidrio templado (continuación)

A22			EMISIÓN DE SO2			
A23			EMISIÓN DE MP2,5			
A24			EMISIÓN DE MP10			
A25			CONSUMO DE LNG		AGOTAMIENTO DEL RECURSO	
A26		FLOTACIÓN CON ESTAÑO		EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE	
A27				EMISIÓN DE SO2		
A28				EMISIÓN DE CO		
A29				EMISIÓN DE MP10		
A30				EMISIÓN DE CO2		
A31					EMISIÓN DE NOx	DAÑO A LA SALUD HUMANA
A32					EMISIÓN DE SO2	
A33					EMISIÓN DE CO	
A34					EMISIÓN DE MP10	
A35					EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN DE GEI
A36					EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN DEL SUELO
A37					EMISIÓN DE SO2	
A38					EMISIÓN DE CO2	
A39					EMISIÓN DE MP10	
A40					EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
A41					EMISIÓN DE MP10	
A42				EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN FLORA	
A43				EMISIÓN DE SO2		
A44				EMISIÓN DE MP10		
A45				CONSUMO DE LNG		AGOTAMIENTO DEL RECURSO
A46	RECOCIDO		EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE		
A47				FORMACIÓN DE GEI		

Anexo A1: Matriz impactos ambientales vidrio templado (continuación)

A48			ALTERACIÓN DEL SUELO	
A49			ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA	
A50		CONSUMO DE LNG	AGOTAMIENTO DEL RECURSO	
A51	CORTE	CONSUMO DE ELECTRICIDAD	AGOTAMIENTO DEL RECURSO	
A52	TEMPLADO	EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE	
A53		EMISIÓN DE SO2		
A54		EMISIÓN DE CO		
A55		EMISIÓN DE MP10		
A56		EMISIÓN DE CO2		
A57		EMISIÓN DE NOx	DAÑO A LA SALUD HUMANA	
A58		EMISIÓN DE SO2		
A59		EMISIÓN DE CO		
A60		EMISIÓN DE MP10		
A61		EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN DE GEI	
A62		EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN DEL SUELO	
A63		EMISIÓN DE SO2		
A64		EMISIÓN DE CO2		
A65		EMISIÓN DE MP10		
A66		EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA	
A67		EMISIÓN DE MP10	ALTERACIÓN FLORA	
A68		EMISIÓN DE NOx		
A69		EMISIÓN DE SO2		
A70		EMISIÓN DE MP10		
A71			CONSUMO DE ELECTRICIDAD	AGOTAMIENTO DEL RECURSO

Anexo A1: Matriz impactos ambientales vidrio templado (continuación)

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
A1	-	8	2	2	2	3	2	4	2	4	2	49	Significativo
A2	-	8	2	2	2	3	2	4	2	4	2	49	Significativo
A3	-	4	2	2	2	3	2	4	2	4	2	37	No Significativo
A4	-	2	2	2	2	3	2	4	2	4	2	31	No Significativo
A5	-	2	2	2	2	3	2	4	2	4	2	31	No Significativo
A6	-	8	2	2	2	3	2	4	2	4	2	49	Significativo
A7	-	2	1	1	3	4	3	4	1	4	2	30	No Significativo
A8	-	2	1	1	3	4	3	4	1	4	2	30	No Significativo
A9	-	4	2	1	3	4	3	4	1	4	2	38	No Significativo
A10	-	4	2	1	3	4	3	4	1	4	2	38	No Significativo
A11	-	4	2	1	3	4	3	4	1	4	2	38	No Significativo
A12	-	8	2	2	4	4	4	4	4	4	2	56	Significativo
A13	-	1	1	1	4	4	3	4	1	1	2	25	No Significativo
A14	-	1	1	1	4	4	3	4	1	1	2	25	No Significativo
A15	-	1	1	1	4	4	3	4	1	1	2	25	No Significativo
A16	-	2	2	1	4	4	3	4	1	1	2	30	No Significativo
A17	-	2	2	1	4	4	3	4	1	1	2	30	No Significativo
A18	-	2	1	1	4	3	3	4	1	1	2	27	No Significativo
A19	-	1	1	1	4	3	3	4	1	1	2	24	No Significativo
A20	-	1	1	1	4	3	3	4	1	1	2	24	No Significativo
A21	-	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	17	No Significativo
A22	-	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	17	No Significativo
A23	-	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	20	No Significativo

Anexo A1: Matriz impactos ambientales vidrio templado (continuación)

A24	-	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	20	No Significativo
A25	-	4	1	1	8	5	8	1	1	4	2	44	No Significativo
A26	-	4	2	2	2	3	2	4	2	4	2	37	No Significativo
A27	-	4	2	2	2	3	2	4	2	4	2	37	No Significativo
A28	-	4	2	2	2	3	2	4	2	4	2	37	No Significativo
A29	-	2	2	2	2	3	2	4	2	4	2	31	No Significativo
A30	-	8	2	2	2	3	2	4	2	4	2	49	Significativo
A31	-	2	1	1	3	4	3	4	1	4	2	30	No Significativo
A32	-	2	1	1	3	4	3	4	1	4	2	30	No Significativo
A33	-	4	2	1	3	4	3	4	1	4	2	38	No Significativo
A34	-	4	2	1	3	4	3	4	1	4	2	38	No Significativo
A35	-	8	2	2	4	4	4	4	2	4	2	54	Significativo
A36	-	1	1	1	4	4	3	4	1	1	2	25	No Significativo
A37	-	1	1	1	4	4	3	4	1	1	2	25	No Significativo
A38	-	1	1	1	4	4	3	4	1	1	2	25	No Significativo
A39	-	2	2	1	4	4	3	4	1	1	2	30	No Significativo
A40	-	2	2	1	4	3	2	4	2	1	2	29	No Significativo
A41	-	1	2	1	4	3	2	4	2	1	2	26	No Significativo
A42	-	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	17	No Significativo
A43	-	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	17	No Significativo
A44	-	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	20	No Significativo
A45	-	4	1	1	8	5	8	1	1	4	2	44	No Significativo
A46	-	4	2	2	2	3	2	4	2	4	2	37	No Significativo
A47	-	8	2	2	4	4	2	4	4	4	2	54	Significativo
A48	-	2	1	1	4	3	2	4	1	1	2	26	No Significativo

Anexo A1: Matriz impactos ambientales vidrio templado (continuación)

A49	-	2	2	1	4	3	2	4	1	1	2	28	No Significativo
A50	-	4	1	1	8	5	8	1	1	4	2	44	No Significativo
A51	-	4	1	1	8	5	8	1	1	4	2	44	No Significativo
A52	-	4	2	2	2	3	2	4	2	4	2	37	No Significativo
A53	-	4	2	2	2	3	2	4	2	4	2	37	No Significativo
A54	-	4	2	2	2	3	2	4	2	4	2	37	No Significativo
A55	-	2	2	2	2	3	2	4	2	4	2	31	No Significativo
A56	-	4	2	2	2	3	2	4	2	4	2	37	No Significativo
A57	-	1	1	1	3	4	4	4	1	4	2	28	No Significativo
A58	-	1	1	1	3	4	4	4	1	4	2	28	No Significativo
A59	-	2	2	1	3	4	4	4	1	4	2	33	No Significativo
A60	-	2	1	1	3	4	4	4	1	4	2	31	No Significativo
A61	-	8	2	2	4	4	4	4	4	4	2	56	Significativo
A62	-	1	1	1	4	3	3	4	2	1	2	25	No Significativo
A63	-	1	1	1	4	3	3	4	2	1	2	25	No Significativo
A64	-	1	1	1	4	3	3	4	2	1	2	25	No Significativo
A65	-	2	2	1	4	3	3	4	2	1	2	30	No Significativo
A66	-	2	2	1	4	3	2	4	2	1	2	29	No Significativo
A67	-	2	2	1	4	3	2	4	2	1	2	29	No Significativo
A68	-	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	17	No Significativo
A69	-	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	17	No Significativo
A70	-	2	2	1	2	2	2	1	1	1	2	22	No Significativo
A71	-	4	1	1	8	5	8	1	1	4	2	44	No Significativo

Anexo A2: Matriz impactos ambientales marcos de aluminio

ID	ETAPA	ACTIVIDAD O PROCESO	ASPECTO	IMPACTO
B1	FABRICACIÓN DE MARCOS DE ALUMINIO	PROCESO BAYERN	EMISIÓN DE SO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
B2			EMISIÓN DE CO2	
B3			EMISIÓN DE MP10	
B4			GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS	CONTAMINACIÓN DEL SUELO
B5			EMISIÓN DE SO2	DAÑO SALUD HUMANA
B6			EMISIÓN DE MP10	
B7			EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN GEI
B8			EMISIÓN DE SO2	ALTERACIÓN DEL SUELO
B9			EMISIÓN DE CO2	
B10			EMISIÓN DE MP10	
B11			EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
B12			EMISIÓN DE MP10	ALTERACIÓN FLORA
B13			EMISIÓN DE SO2	
B14			EMISIÓN DE CO2	
B15			EMISIÓN DE MP10	AGOTAMIENTO DEL RECURSO
B16			CONSUMO ELÉCTRICO	
B17		PROCESO DE HALL - HEROÚLT	EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
B18			EMISIÓN DE SO2	
B19			EMISIÓN DE CO2	
B20			EMISIÓN DE NOx	DAÑO SALUD HUMANA
B21			EMISIÓN DE SO2	
B22			EMISIÓN DE CO2	FORMACIÓN GEI
B23			EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN DEL SUELO
B24			EMISIÓN DE SO2	
B25			EMISIÓN DE CO2	
B26			EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
B27			EMISIÓN DE NOx	ALTERACIÓN FLORA
B28			EMISIÓN DE SO2	
B29			EMISIÓN DE CO2	
B30			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO
B31		EXTRUSIÓN	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
B32				FORMACIÓN DE GEI
B33				ALTERACIÓN DEL SUELO
B34				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
B35			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO

Anexo A2: Matriz impactos ambientales marcos de aluminio (continuación)

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
B1	-	4	4	4	3	3	4	1	1	4	2	42	No Significativo
B2	-	4	4	4	3	3	4	1	1	4	2	42	No Significativo
B3	-	8	4	4	3	3	4	1	1	4	2	54	Significativo
B4	+	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	27	No Significativo
B5	-	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	27	No Significativo
B6	-	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	27	No Significativo
B7	-	8	4	4	4	3	4	4	1	4	2	58	Significativo
B8	-	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	27	No Significativo
B9	-	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	27	No Significativo
B10	-	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	27	No Significativo
B11	-	2	2	2	4	2	3	1	1	1	2	26	No Significativo
B12	-	2	2	2	4	2	3	1	1	1	2	26	No Significativo
B13	-	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	23	No Significativo
B14	-	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	23	No Significativo
B15	-	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	23	No Significativo
B16	-	4	4	1	8	3	8	1	1	4	2	48	No Significativo
B17	-	8	4	4	3	3	4	1	1	4	2	54	Significativo
B18	-	8	4	4	3	3	4	1	1	4	2	54	Significativo
B19	-	8	4	4	3	3	4	1	1	4	2	54	Significativo
B20	-	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	27	No Significativo
B21	-	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	27	No Significativo
B22	-	8	4	4	4	3	4	4	1	4	2	58	Significativo
B23	-	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	27	No Significativo
B24	-	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	27	No Significativo
B25	-	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	27	No Significativo
B26	-	2	2	2	4	2	3	1	1	1	2	26	No Significativo
B27	-	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	23	No Significativo
B28	-	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	23	No Significativo
B29	-	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	23	No Significativo
B30	-	12	8	4	8	4	8	1	1	4	2	84	Significativo
B31	4	4	4	4	3	4	4	1	4	2	2	44	No Significativo
B32	8	4	4	4	3	4	4	1	4	2	2	44	No Significativo
B33	2	2	2	4	2	4	1	1	1	2	2	27	No Significativo
B34	2	2	2	4	2	3	1	1	1	2	2	26	No Significativo
B35	4	4	1	8	3	8	1	1	4	2	2	43	No Significativo

Anexo A3: Matriz impactos ambientales marcos de film EVA

ID	ETAPA	ACTIVIDAD O PROCESO	ASPECTO	IMPACTO
C1	FABRICACIÓN DE ETIL VINIL ACETATO (EVA)	POLIMERIZACIÓN	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
C2				FORMACIÓN DE GEI
C3				ALTERACIÓN DEL SUELO
C4				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
C5			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO
C6			EMISIÓN DE ETILENO	CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA
C7		EXTRUSIÓN	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
C8				FORMACIÓN DE GEI
C9				ALTERACIÓN DEL SUELO
C10				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
C11			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO

Anexo A3: Matriz impactos ambientales marcos de film EVA (continuación)

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
C1	-	8	4	3	3	3	2	1	1	4	4	53	Significativo
C2	-	8	4	3	4	3	4	2	2	4	4	58	Significativo
C3	-	4	4	3	2	2	2	1	1	4	4	39	No Significativo
C4	-	4	4	3	2	2	2	1	1	4	4	39	No Significativo
C5	-	8	4	3	8	4	8	1	1	4	4	65	Significativo
C6	+	1	1	1	1	2	1	1	1	4	4	20	No Significativo
C7	-	4	2	3	3	2	2	1	1	4	4	36	No Significativo
C8	-	4	2	3	4	3	3	2	2	4	4	41	No Significativo
C9	-	4	2	2	2	2	2	1	1	4	4	34	No Significativo
C10	-	4	2	2	2	2	2	1	1	4	4	34	No Significativo
C11	-	4	2	1	8	4	4	1	1	4	4	43	No Significativo

Anexo A4: Matriz impactos ambientales silicio de grado eléctrico policristalino.

ID	ETAPA	ACTIVIDAD O PROCESO	ASPECTO	IMPACTO
D1	FABRICACIÓN DE SILICIO DE GRADO ELÉCTRICO POLICRISTALINO	FUNDICIÓN	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
D2				FORMACIÓN DE GEI
D3				ALTERACIÓN DEL SUELO
D4				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
D5			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO
D6			GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS	CONTAMINACIÓN DEL SUELO
D7			EMISIÓN DE HUMO DE SILICE	CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA
D8		PROCESO DE SIEMENS	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
D9				FORMACIÓN DE GEI
D10				ALTERACIÓN DEL SUELO
D11				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
D12			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO

Anexo A4: Matriz impactos ambientales silicio de grado eléctrico policristalino (continuación).

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
D1	-	4	2	3	3	3	3	1	2	4	2	37	No Significativo
D2	-	4	4	3	4	3	4	4	2	4	2	46	No Significativo
D3	-	2	2	2	2	3	2	1	1	1	2	24	No Significativo
D4	-	2	2	2	2	3	2	1	1	1	2	24	No Significativo
D5	-	2	4	4	8	4	8	1	1	4	2	46	No Significativo
D6	+	1	1	1	1	2	1	1	1	4	4	20	No Significativo
D7	+	1	1	1	1	2	1	1	1	4	4	20	No Significativo
D8	-	8	4	3	3	3	3	1	2	4	2	53	Significativo
D9	-	8	4	3	4	3	4	4	2	4	2	58	Significativo
D10	-	4	2	2	2	3	2	1	1	1	2	30	No Significativo
D11	-	4	2	2	2	3	2	1	1	1	2	30	No Significativo
D12	-	8	4	4	8	4	8	1	1	4	4	66	Significativo

Anexo A5: Matriz impactos ambientales fabricación de paneles solares.

ID	ETAPA	ACTIVIDAD O PROCESO	ASPECTO	IMPACTO
E1	FABRICACIÓN DE PANELES SOLARES FOTVOLTAÍCOS POLICRISTALINOS	PRIMER CORTE	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
E2				FORMACIÓN DE GEI
E3				ALTERACIÓN DEL SUELO
E4				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
E5			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO
E6		SEGUNDO CORTE	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
E7				FORMACIÓN DE GEI
E8				ALTERACIÓN DEL SUELO
E9				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
E10			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO
E11		UNIÓN P-N	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
E12				FORMACIÓN DE GEI
E13				ALTERACIÓN DEL SUELO
E14				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
E15			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO
E16		INSERCIÓN DE CONTACTOS	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
E17				FORMACIÓN DE GEI
E18				ALTERACIÓN DEL SUELO
E19				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
E20			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO
E21		ENCAPSULADO	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
E22				FORMACIÓN DE GEI
E23				ALTERACIÓN DEL SUELO
E24				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
E25			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO

Anexo A5: Matriz impactos ambientales fabricación de paneles solares (continuación).

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
E1	-	2	1	1	3	4	3	4	2	4	2	31	No Significativo
E2	-	2	1	1	4	4	4	4	2	4	2	33	No Significativo
E3	-	1	1	1	2	3	2	1	1	4	2	21	No Significativo
E4	-	1	1	1	2	3	2	1	1	4	2	21	No Significativo
E5	-	2	1	1	8	4	8	1	1	4	2	37	No Significativo
E6	-	2	1	1	3	4	3	4	2	4	2	31	No Significativo
E7	-	2	1	1	4	4	4	4	2	4	2	33	No Significativo
E8	-	1	1	1	2	3	2	1	1	4	2	21	No Significativo
E9	-	1	1	1	2	3	2	1	1	4	2	21	No Significativo
E10	-	2	1	1	8	4	8	1	1	4	2	37	No Significativo
E11	-	4	2	2	3	4	3	4	2	4	2	40	No Significativo
E12	-	4	2	2	4	4	4	4	2	4	2	42	No Significativo
E13	-	2	2	2	2	3	2	1	1	4	2	27	No Significativo
E14	-	2	2	2	2	3	2	1	1	4	2	27	No Significativo
E15	-	4	4	2	8	4	8	1	1	4	2	50	Significativo
E16	-	1	2	1	3	4	3	4	2	4	2	30	No Significativo
E17	-	1	2	1	4	4	4	4	2	4	2	32	No Significativo
E18	-	1	2	1	2	3	2	1	1	4	2	23	No Significativo
E19	-	1	2	1	2	3	2	1	1	4	2	23	No Significativo
E20	-	1	2	1	8	4	8	1	1	4	2	36	No Significativo
E21	-	8	4	3	3	4	3	4	2	4	2	57	Significativo
E22	-	8	4	3	4	4	4	4	2	4	2	59	Significativo
E23	-	4	4	3	2	3	2	1	1	4	2	38	No Significativo
E24	-	4	4	3	2	3	2	1	1	4	2	38	No Significativo
E25	-	8	4	3	8	4	8	1	1	4	2	63	Significativo

Anexo A5: Matriz impactos ambientales reciclaje de paneles solares.

ID	ETAPA	ACTIVIDAD O PROCESO	ASPECTO	IMPACTO
D1	RECICLAJE DE PANELES SOLARES FOTVOLTAÍCOS POLICRISTALINOS	SEPARACIÓN MECÁNICA	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
D2				FORMACIÓN DE GEI
D3				ALTERACIÓN DEL SUELO
D4				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
D5			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO
D6		INCINERACIÓN	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
D7				FORMACIÓN DE GEI
D8				ALTERACIÓN DEL SUELO
D9				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
D10			CONSUMO ELÉCTRICO	AGOTAMIENTO DEL RECURSO
D11		TRASLADO	EMISIÓN DE CO2	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
D12				FORMACIÓN DE GEI
D13				ALTERACIÓN DEL SUELO
D14				ALTERACIÓN CUERPOS DE AGUA
D15			EMISIÓN DE CH4	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
D16				FORMACIÓN DE GEI
D17				DAÑO A LA SALUD HUMANA
D18			EMISIÓN DE N2O	ALTERACIÓN CALIDAD DEL AIRE
D19				FORMACIÓN DE GEI
D20				DAÑO A LA SALUD HUMANA
D21			CONSUMO DIESEL	AGOTAMIENTO DEL RECURSO

Anexo A5: Matriz impactos ambientales reciclaje de paneles solares (continuación).

ID	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	TOTAL	IMPORTANCIA
D1	-	8	4	3	3	3	3	1	2	4	2	53	Significativo
D2	-	8	4	3	3	3	3	4	2	4	2	56	Significativo
D3	-	4	2	1	2	2	2	1	1	1	2	28	No Significativo
D4	-	4	2	1	2	2	2	1	1	1	2	28	No Significativo
D5	-	4	2	1	8	4	8	1	1	4	2	45	No Significativo
D6	-	4	2	2	2	2	3	1	2	4	2	34	No Significativo
D7	-	4	2	2	3	2	3	4	2	4	2	38	No Significativo
D8	-	2	1	1	2	1	2	1	1	1	2	19	No Significativo
D9	-	2	1	1	2	1	2	1	1	1	2	19	No Significativo
D10	-	8	2	2	8	5	8	1	1	4	2	59	Significativo
D11	-	8	4	3	3	3	3	1	2	4	2	53	Significativo
D12	-	8	4	3	3	3	3	4	2	4	2	56	Significativo
D13	-	4	2	1	2	1	2	1	1	1	2	27	No Significativo
D14	-	4	2	1	2	1	2	1	1	1	2	27	No Significativo
D15	-	4	4	2	3	2	3	1	2	4	2	39	No Significativo
D16	-	8	4	2	3	2	3	4	2	4	2	54	Significativo
D17	-	4	2	1	2	1	2	1	1	1	2	27	No Significativo
D18	-	2	4	2	3	2	3	1	2	4	2	33	No Significativo
D19	-	2	4	2	3	2	3	4	2	4	2	36	No Significativo
D20	-	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	21	No Significativo
D21	-	4	2	1	8	4	8	1	1	4	2	45	No Significativo