FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA

Revisión sistemática de métodos y principios técnicos/psicofísicos para mejorar la percepción táctil en interfaces hápticas

MATÍAS RENÉ VIDAL BELTRÁN

Trabajo para optar al Título de

Ingeniero Biomédico

Profesor Guía:

LUIS TOGO ARREDONDO GAMBOA

Diciembre - 2022

Valparaíso - Chile

Resumen

Motivación: Las interfaces Humano-Máquina se han ganado el interés de la población debido al gran potencial que posee para diversas áreas como juegos de realidad virtual, control de exoesqueletos o prótesis, robots tele operables, telecomunicaciones, etc. Es por eso que se hace necesario el retorno de percepción háptica para una mejor experiencia de la interfaz Humano-Máquina y desempeño de la tarea, sobre todo en tele cirugía ya que no hay espacio para el error en ese contexto.
Objetivo: La finalidad de esta revisión es evidenciar las cualidades objetivas y subjetivas de los métodos utilizados para lograr sensaciones táctiles hacia el operador en robótica háptica actualmente.
Método: Se utilizó la base de datos "*Web of Science*" acotando la búsqueda a los últimos 5 años con las palabras claves Interfaz humano-máquina, mejora de la percepción táctil e interfaz háptica.
Resultados: Se obtuvo un total de 92 artículos de los cuales se eliminaron 87 debido a que no aplicaban en la temática abordada por lo que se analizaron 5 artículos.
Conclusión: En base a la revisión realizada se facilita la toma de decisión para determinar el sensor, modelo y forma óptima para realizar un proyecto con un objetivo especifico ya que de manera general no se puede determinar por la gran cantidad de variantes que existen.

Palabras Clave: *Haptic interface, Human-Machine interface, Tactile perception enhancement.*

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 4
2. METODOLOGÍA 4
2.1 Expresión de búsqueda 4
2.2 Análisis de artículos 5
3. RESULTADOS 5
3.1 Selección de artículos 5
3.2 Identificación de fuentes 5
3.3 Tipo de realimentación háptica 6
3.3.1 Sensores de fuerza 6
3.3.1.1 Fabricación y funcionamiento 6
3.3.1.2 Parámetros de adquisición 7
3.3.2 Aleaciones con memoria de forma (SMA) 8
3.3.2.1 Fabricación y funcionamiento 8
3.3.2.2 parámetros de adquisición 9
3.3.3 Actuadores vibratorios 10
4. DISCUSIÓN 11
5. CONCLUSIÓN 11
6. REFERENCIAS 12

Revisión sistemática de métodos y principios técnicos/psicofísicos para mejorar la percepción táctil en interfaces hápticas

Matías René Vidal Beltrán
Escuela de Ingeniería Civil Biomédica
Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, Chile

***Palabras clave**: Haptic interface, Human-Machine interface, Tactile perception enhancement.*

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas Internet se ha convertido en la principal fuente de información, permitiendo la conexión entre personas de diferentes partes del mundo, pudiendo compartir distintos tipos de archivos o realizando llamadas auditivas y/o visuales, todo esto hoy en día es sencillo, sin embargo, lo realmente desafiante es la transmisión de sensaciones hápticas a distancia, desde sentir un apriete de manos hasta la sensación de sostener un utensilio. Para lograr esto se requiere de las interfaces Humano-Máquina (HMI) para teleoperación que se componen básicamente de un dispositivo o máquina controlada de forma remota que se define como esclavo y una interfaz controladora llamada maestro. La interfaz se considera háptica sólo si es capaz de transmitir el sentido del tacto [1], sentido que incluye no sólo lo táctil si no que también sensaciones de temperatura estiramiento vibración presión y dolor, esta variedad de percepciones se debe a una diversa gama receptores en el cuerpo humano[2].

Las HMI para teleoperación además de lo ya mencionado requiere de la parte visual, debido a que el rendimiento aumenta considerablemente cuando el operador puede visualizar lo que esta haciendo el dispositivo o robot ya sea a través de dispositivos de realidad virtual, un sistema de monitores o alguna otra interfaz es imperativo mantener al usuario en todo momento con visualización de la actividad que se realiza [3].

La estimulación háptica en la piel humana puede ser de diferentes formas, en esta revisión sistemática se abordarán tres opciones: vibratoria, de resistencia por medio de la fuerza/presión, estiramiento de la piel.

2. METODOLOGÍA

2.1 EXPRESIÓN DE BÚSQUEDA

Para llevar a cabo la revisión sistemática se utilizo la base de datos *Web of Science* con las palabras claves: *Haptic interface, Human-Machine interface, Tactile perception enhancement*. Se hizo la siguiente expresión de búsqueda:

Base de datos	Expresión de búsqueda
Web of Science	((human machine interface) or (tactile perception enhancement)) AND (HAPTIC INTERFACE)

Tabla 1: Expresión de búsqueda utilizada en la base de datos mencionada.

2.2 ANÁLISIS DE ARTÍCULOS

Para la selección de los artículos obtenidos luego de la búsqueda se utilizaron criterios de inclusión y de exclusión presentados a continuación:
Inclusión:

- Artículos a partir del año 2018.
- Artículos escritos en inglés.
- Artículos relacionados directamente con realimentación háptica con motivos de teleoperación de dispositivos virtuales y/o físicos.

Exclusión:

- Revisiones de literatura.
- Artículos previos al año 2018.
- Artículos no relacionados con manipulación a distancia.

3. RESULTADOS

3.1 SELECCIÓN DE ARTÍCULOS

Una vez realizada la búsqueda en la base de datos mencionada en la sección 2.1, se obtuvo un total de 92 resultados que al aplicar los filtros expresados en la sección 2.2 se eliminaron 87 quedando sólo 5 publicaciones que cumplen con los requisitos impuestos, esto queda expuesto en la figura 1.

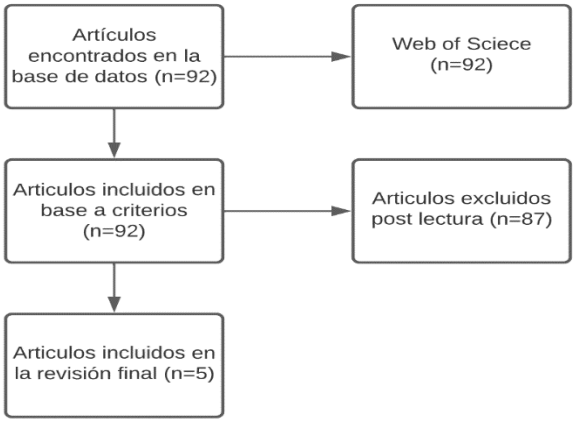


Figura 1: Diagrama de flujo PRISMA, resume proceso de selección de artículos

3.2 IDENTIFICACIÓN DE FUENTES

En la tabla 2 se pueden observar los artículos seleccionados por nombre de autor, fecha y características de funcionamiento relevantes identificadas de forma preliminar, además, se encuentran ordenadas de forma temporal.

Nombre	Año	Realimentación háptica	Tipo de equipo
A. Haynes [4]	2019	Aleaciones con memoria de forma (SMA)	Dispositivo unido a la piel del antebrazo
W. Franco [1]	2019	Sensor de fuerza	Prototipo de dedo Háptico
M. Zhu [5]	2020	Chip piezoeléctrico	Guante

Y. Liu [6]	2022	Actuadores Vibratorios	CL-HMI integrado en la piel del brazo
G-Y Liu [3]	2022	Sensor de fuerza	Dispositivo tipo joystick manual

Tabla 2: Identificación de los artículos seleccionados según sus datos relevantes para esta revisión

3.3 TIPO DE REALIMENTACIÓN HÁPTICA

En las publicaciones seleccionadas se evidencian tres métodos distintos de estimulación háptica, estos métodos son, Sensores de fuerza [1] [3], Aleaciones con memoria de forma [4], Actuadores vibratorios [5] [6].

3.3.1 Sensores de fuerza

3.3.1.1 Fabricación y funcionamiento

Las publicaciones con este método en esencia son similares, pero derivan en la orientación de la aplicación del dispositivo, ambos dispositivos miden cuánta es la fuerza aplicada por el usuario al hacer el movimiento y con eso realizar una fuerza de reflexión en la proporción que las condiciones lo requieran para dar la sensación correcta de resistencia de lo que sea que se está manipulando a distancia o simulando.

Para el caso de W. Franco [1] se fabricó un prototipo de dedo háptico donde el operador flexiona y/o estira el dedo de forma vertical 1 DoF sobre un varillaje de cuatro barras que al ser lineal se puede comparar con un balancín, esto permite analizar la posición angular del dedo y la fuerza generada para mover el sistema, éste a su vez compuesto de un músculo de McKibben se expande o contrae al contrario de la flexión y extensión respectivamente. Produciendo una fuerza de reflexión F_{mu} como se aprecia en la figura 2.

Para el caso de G-Y Liu [3] se utilizó el dispositivo llamado iHandle en combinación con los dispositivos hápticos iGrasp-T y iGrasp-R diseñados para teleoperación robótica. iGrasp-R permite 3 DoF rotacionales mientras que iGrasp-T permite 3 DoF traslacionales, iHandle se puede fijar a cualquiera de los sistemas recién mencionados, en su cabezal se detecta la fuerza que el usuario ejerce sobre el dispositivo para realizar el movimiento deseado, esta señal se comparte con el dispositivo háptico que genera la resistencia adecuada según el contexto en que se encuentra el robot esclavo (Figura 3).

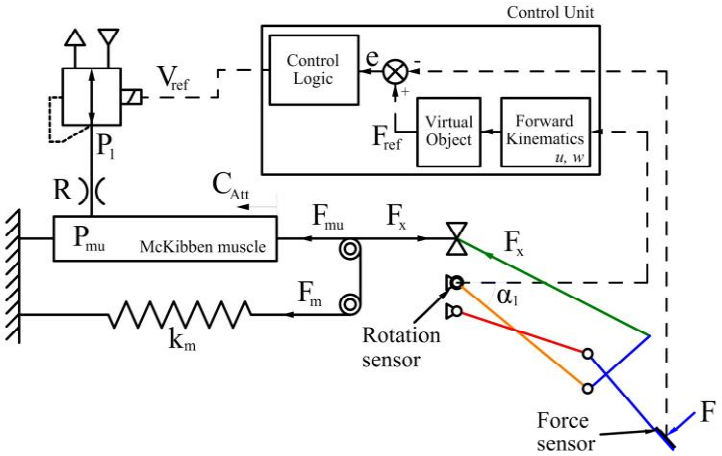


Figura 2:Esquema del dispositivo de W. Franco [1]

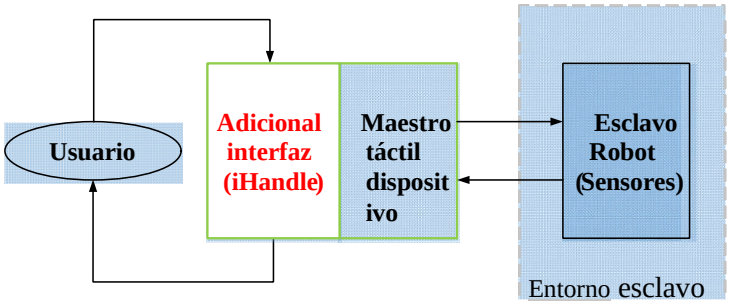
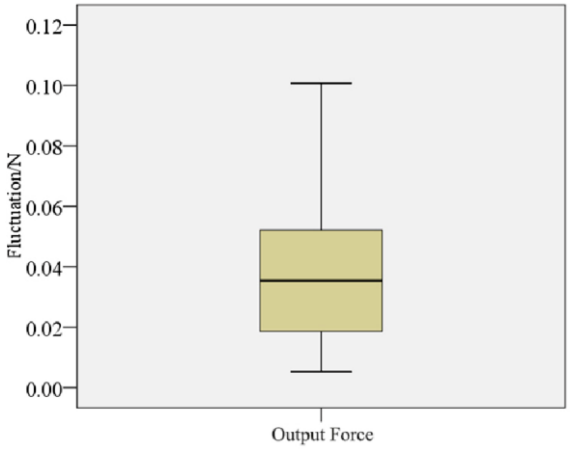


Figura 3: Diagrama de bloques G-Y Liu [3]

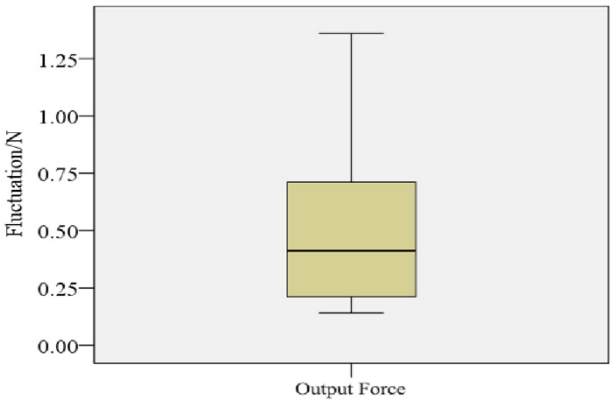
3.3.1.2 Parámetros de adquisición

Ambos autores fijaron parámetros teóricos mediante modelos matemáticos en los cuales se buscaba predecir la fluctuación de la fuerza aplicada durante el uso del prototipo, en el contexto de G-Y Liu también se evidenció y registró el ruido producido por el temblor de la mano.

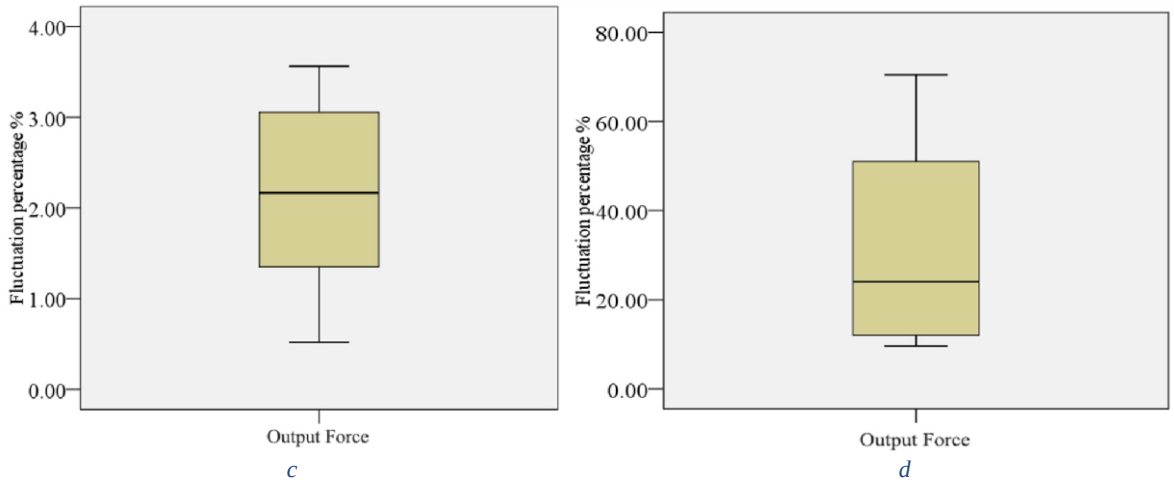
Para definir la fuerza de realimentación en cada caso de debieron considerar los factores del sistema maestro y esclavo, al momento de aplicar los experimentos se obtuvieron resultados distintos a los teóricos e incluso diferentes entre pruebas experimentales con y sin humanos como es el caso de G-Y Liu [3] en que de forma primera se realizo una prueba del equipo en puntos estratégicos fijos y luego se hizo la misma prueba pero con humanos sosteniendo el mando.(ver figura 4)
Para el caso de W. Franco se varió el objeto virtual haciendo que sean más o menos rígidos, por ende variando el valor de la resistencia y de la fuerza necesaria a aplicar, mostrando que mientras más fuerza se debe aplicar en objetos más rígidos se produjeron diferencias entre los resultados experimentales y simulados, aunque tuvo la capacidad de predecir con buena precisión la tendencia de la fuerza en condiciones dinámicas por ende se validó el modelo (Figura 5).



a



b



c *d*

Figura 4:: a) Fluctuación de la fuerza de salida bajo fijación; b) Fluctuación de la fuerza de salida bajo manipulación humana; c) Porcentaje de fluctuación de la fuerza de salida bajo fijación; d) Porcentaje de fluctuación de la fuerza de salida bajo manipulación [3]

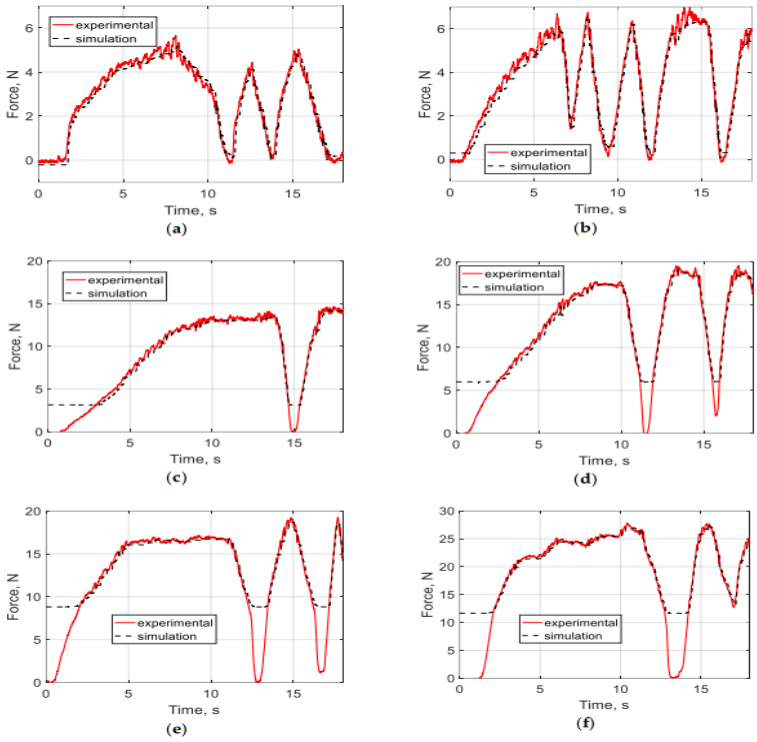


Figura 5: Comparación entre resultados experimentales y simulados [1]

3.3.2 Aleaciones con memoria de forma (SMA)

3.3.2.1 Fabricación y funcionamiento

Los autores decidieron utilizar aleaciones con memoria de forma ya que son ligeros, flexibles y silenciosos para así conseguir un mecanismo más delicado y sutil. Está compuesto de plástico de ácido poliláctico la estructura es plana en forma de diamante y fue impreso en una impresora 3D (Figua), Además, posee dos

bobinas SMA ubicadas en las esquinas opuestas de forma ortogonal a 8 cm de distancia una de la otra y a 4 mm de la piel cada una. la forma de actuar es mediante estiramiento y compresión de la piel que gracias al material empleado aunque se desforme (dentro del límite impuesto de ±5 mm) volverá a la forma original sin problemas.

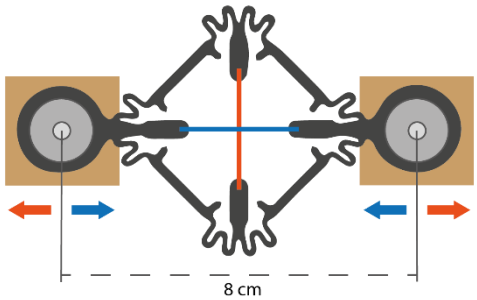


Figura 6: Dispositivo de estimulación táctil SCWEES [4].

3.3.2.2 parámetros de adquisición

Se buscó obtener tres parámetros sensación, Imitación de movimiento y Detección en distracción. Para que los resultados subjetivos sobre la sensación sean evaluados se usó el modelo circunplex de afecto [8], para el caso de imitación fue de igual manera subjetivo pero la respuesta fue registrada por el experimentador, por último, la evaluación de la distracción fue del todo subjetiva ya que dependía de la sensibilidad de cada participante para detectar el estímulo efectuado. [4]

Los resultados por sección fueron positivos, demostrando: El confort otorgado por el dispositivo siendo calificado como agradable para el usuario independiente de la duración del estímulo (Figura 7 y 8), La buena comunicación entre usuarios a distancia ya que permite sentir las acciones realizadas entre diferentes usuarios, Ser menos perjudicial para el usuario permitiendo que los usuarios sientan las notificaciones realizando diversas actividades, aunque los usuarios reportaron que se les era más difícil percibir la señal realizando actividades con movimientos (figura 9).

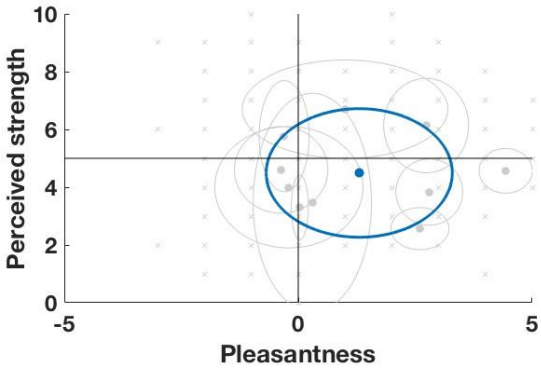


Figura 7: Media y desviación estándar de las respuestas a todos los estímulos para todos los participantes en el plano circunplex (azul). Los datos brutos (x) y las medias individuales de los participantes y las desviaciones estándar (sólidos) se muestran en gris

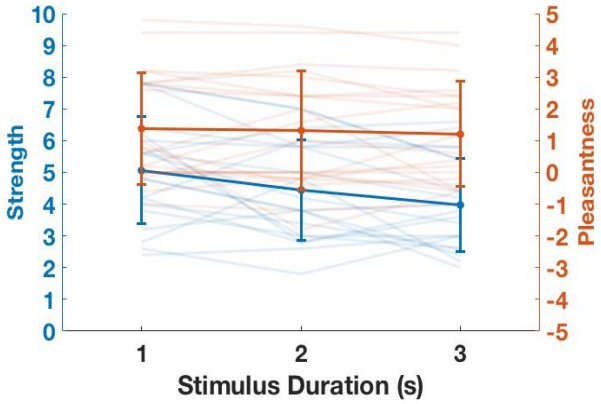


Figura 8: Media y desviación estándar de la fuerza percibida y los resultados de placer entre los participantes para las tres duraciones de los estímulos en la Sección 1

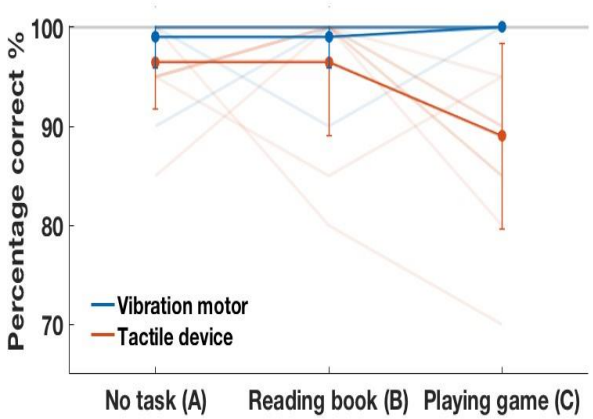


Figura 9: Porcentaje medio de pulsaciones correctas de botones entre todos los participantes para estímulos de vibración y dispositivo SCWEES durante cada tarea; A) ninguna tarea, B) leer el libro y C) jugar el juego.

3.3.3 Actuadores vibratorios

Los actuadores vibratorios se diferencian en cada artículo, En el primer artículo los autores utilizaron dispositivos piezoeléctricos [5]. Estos dispositivos funcionan realizando el efecto piezoeléctrico inverso, transformando la entrada eléctrica proveniente del procesamiento de la señal del sensor de fuerza (PWM) en la estimulación mecánica con la intensidad deseada regulada por voltaje.

mientras que en el segundo artículo [6] se utilizó un imán permanente pegado sobre un disco delgado de tereftalato de polietileno con una hendidura semicircular ubicado sobre un anillo de resina. El funcionamiento es similar, los sensores de presión en el robot envían la señal correspondiente que llega al módulo bluetooth y este envía la señal eléctrica al actuador háptico que comienza a vibrar con una frecuencia dependiente de la corriente de modulación de ancho de pulso.

4. DISCUSIÓN

En base a los resultados obtenidos se evidencia que hay diversas formas de abordar un mismo objetivo que sería devolver una sensación de tacto al usuario al momento de manipular o interactuar con un objeto ya sea virtual o real a distancia, se logró identificar tres métodos para este propósito que varían en cuanto a tecnología destacando la propuesta de Y. Liu [6] que avanza a un diseño más complejo tecnológicamente hablando pero miniaturizado dejando atrás los aparatos voluminosos, rígidos y poco precisos. También varían en cuanto a objetivo, si bien todos buscan recibir una realimentación háptica A. Haynes [4] busca mayor comodidad e interactuar entre personas a distancia, W. Franco [1], M. Zhu [5] e Y.Liu [6] buscan simular la manipulación a distancia con las manos a diferencia de G-Y Liu [3] que busca la manipulación de objetos pero con un mando manejable.

La principal limitación de la investigación fue que el objetivo de cada diseño variaba por lo tanto los experimentos y la forma de validar cada resultado también, a modo de explicación, la subjetividad de los resultados obtenidos por el autor A. Haynes [4] no es comprable con los resultados obtenidos por W. Franco [1] o G-Y Liu [3] ya que cada prototipo posee una finalidad distinta. Otra limitación es la cantidad de personas que se sometieron a los experimentos teniendo el máximo de voluntarios G-Y Liu con 20 participantes. Si bien la imagen es una parte fundamental al momento de teleoperar sólo se utiliza a modo de visualizar lo que ocurre desaprovechando la opción de visualizar señales como colores al momento de realizar acciones.

En relación con los resultados obtenidos queda la siguiente interrogante, ¿Es conveniente mezclar los métodos?,¿Cuánto afecta la sensibilidad de cada individuo?,¿Es conveniente incorporar señales visuales? Cada autor utiliza un método por separado para abordar la problemática dejando fuera la posibilidad en esta revisión de concluir si será bueno o no realizar una mezcla de dispositivos.

5. CONCLUSIÓN

La revisión de la literatura permitió identificar las metodologías existentes, la forma de aplicarlas, sus limitaciones y la dirección en la que se dirige el desarrollo de tecnología háptica, teniendo como foco principal la realimentación háptica y la reducción del dispositivo maestro para un mejor manejo del robot esclavo y para una mayor comodidad al momento de teleoperar.

En base a los datos obtenidos se puede determinar cuál es el método óptimo al momento de realizar un proyecto considerando la función que tendrá éste a pesar de que no exista una convergencia oficial sobre qué método es el mejor a utilizar de forma general ya que varía según la finalidad que se desea abordar. En un futuro se puede considerar al momento de implementar una interfaz Humano-Máquina la prueba de alertas visuales o la integración de sensores para dar una mejor sensación al retorno háptico, además, expandir la muestra de personas voluntarias y que pertenezcan al medio para el cual se desarrollará la interfaz para así obtener resultados más confiables y precisos. También se puede evaluar la posibilidad de estudiar el tiempo necesario que requiere una persona para adquirir la habilidad necesaria para manejar de forma adecuada el dispositivo en estudio.

6. REFERENCIAS

[1] W. Franco, D. Maffiodo, C. De Benedictis y C. Ferraresi, «Use of McKibben Muscle in a Haptic Interface,» *Robotics,* vol. 8, nº 1, p. 13, Febrero 2019.

[2] P. Delmas, J. Hao y L. Rodat-Despoix, «Molecular mechanisms of mechanotransduction in mammalian sensory neurons,» *Nat Rev Neurosci,* vol. 12, nº 3, 9 febrero 2011.

[3] G.-Y. Liu, «Experimental Evaluation on Haptic Feedback Accuracy by Using Two Self-Made Haptic Devices and One Additional Interface in Robotic Teleoperation,» 14 Enero 2022. [En línea]. Available: http://dx.doi.org/10.3390/act11010024.

[4] A. Haynes, M. F. Simons, T. Helps, Y. N. y J. Rossiter, «A Wearable Skin-Stretching Tactile Interface for Human–Robot and Human–Human Communication,» *IEEE Robotics and Automation Letters,* vol. 4, nº 2, pp. 1641-1646, Abril 2019.

[5] M. Zhu, Z. Sun, Z. Zhang, Q. Shi, T. He, H. Liu, T. Chen y C. Lee, «Haptic-feedback smart glove as a creative human-machine interface (HMI) for virtual/augmented reality applications,» *Science Advances,* vol. 6, nº 19, Mayo 2020.

[6] Y. Liu, C. Yiu, Z. Song, Y. Huang, K. Yao, T. Wong, J. Zhou y L. Zhao, «Electronic skin as wireless human-machine interfaces for robotic VR,» *Science Advances,* vol. 8, nº 2, Enero 2022.

[7] M. J. P. J. E. M. P. M. B. I. B. T. C. H. C. D. M. L. S. J. M. T. E. A. A. S. E. B. R. C. J. G. J. M. G. A. H. M. M. L. T. L. E. W. L. E. M.-W. S. M. L. A. M. L. A. S. J. T. A. C. T. V. A. W. P. W. D. M. J. J. Y.-N. G. U. M. R.-G. y S. A.-F. , *Declaración Prisma 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas,* Revista Española de Cardiología, 2021.

[8] J. Posner, J. Russell y B. Peterson, «The circumplex model of affect: an integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology,» *Development and psychopathology,* vol. 17, nº 3, pp. 715-734, 2005.