

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

Estudio de una plataforma de teleoperación bilateral prototipo para pruebas de algoritmos de control basados en la convergencia de estados

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

AUTOR

Ingrid María Horna Vilcahuamán

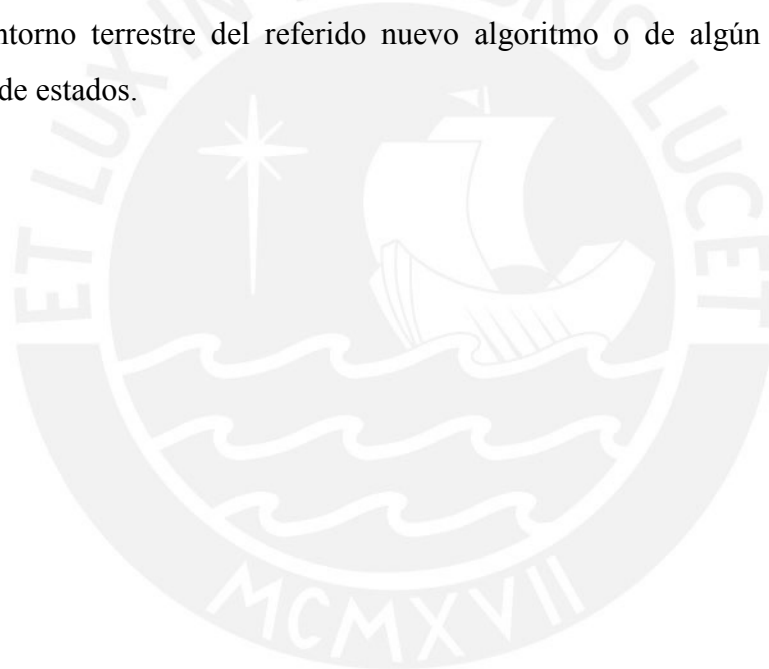
ASESOR:

Pablo Cárdenas Cáceres

Lima, agosto, 2020

RESUMEN

Los sistemas teleoperados siguen siendo un campo de investigación de vigente importancia en el mundo. Cuentan con diversas áreas de aplicación y por ello continuamente se desarrollan nuevos algoritmos de control con los que mejorar las prestaciones de telepresencia y estabilidad del sistema en conjunto. Sin embargo, existe la necesidad de probar la eficacia de esos algoritmos en entornos reales aparte de los simulados. La Pontificia Universidad Católica del Perú es una de las instituciones académicas que realiza investigaciones de ese tipo. Específicamente, en sus laboratorios se está desarrollando un algoritmo de teleoperación bilateral basado en la convergencia de estados para manipuladores en entorno submarino. Por lo tanto, en el presente trabajo de investigación se detallarán los lineamientos para el diseño de una plataforma teleoperada donde realizar las pruebas en entorno terrestre del referido nuevo algoritmo o de algún otro basado en la convergencia de estados.



ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo 1: MARCO PROBLEMÁTICO	2
1.1. Motivación	2
1.2. Estado del arte	3
1.3. Justificación	8
Capítulo 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
2.1. Visión general	10
2.2. Marco teórico	10
2.2.1. Sistemas de teleoperación	11
2.2.2. Algoritmos de control bilateral	12
2.2.3. Algoritmo FOC para motores <i>brushless</i>	15
2.2.4. VDI 2206	17
2.2.4.1. Elaboración de la lista de exigencias	18
2.2.4.2. Elaboración de la estructura de funciones	19
2.2.4.3. Elaboración de la alternativa de solución óptima	19
2.2.4.4. Elaboración del diseño definitivo	19
2.2.4.5. Validación del diseño definitivo	19
Conclusiones	21
Recomendaciones y trabajos futuros	22
Bibliografía	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama de bloques de un sistema teleoperado	12
Figura 2.2. Diagrama de bloques del esquema de control por convergencia de estados	14



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Cuadro comparativo resumen del estado del arte

8



INTRODUCCIÓN

Los sistemas teleoperados son una herramienta comúnmente empleada para realizar actividades en zonas de difícil o peligroso acceso. El usuario ejecuta movimientos en un dispositivo a su alcance (maestro) mientras un dispositivo más alejado (esclavo), no manipulado directamente, replica estas acciones con el fin de completar una tarea determinada. Los comandos se transmiten de un artefacto a otro mediante un canal o medio específico. Aplicaciones actuales contemplan variados ámbitos: desde la operación de mecanismos remotos para extraer muestras materiales en el espacio exterior hasta la realización de intervenciones quirúrgicas con robots controlados a distancia [1]. Sin embargo, gran parte de la efectividad de estos sistemas depende del esquema de control que se implemente en ellos.

La convergencia de estados es uno de los esquemas de control usados como referencia al plantear nuevos algoritmos de control bilateral. En su mayoría, las investigaciones de este tipo emplean hardware ya implementado o disponible comercialmente. No obstante, se pueden obtener ventajas adicionales si las plataformas de pruebas de los algoritmos se desarrollan en paralelo a la investigación y su diseño es adaptado a las necesidades de implementación del nuevo algoritmo.

CAPÍTULO 1

MARCO PROBLEMÁTICO

Continuamente, se desarrollan nuevos algoritmos de control para mejorar las prestaciones de un tipo de sistema en específico. Una etapa importante en el desarrollo es la validación del algoritmo antes de su implementación en el sistema real. Sin embargo, este paso suele reducirse a la simulación en software si no se cuenta con una plataforma de pruebas semejante al sistema real. Entonces, la validación del algoritmo sería incompleta o no determinante. En el presente capítulo se detalla dicha problemática.

1.1 Motivación

El desarrollo de nuevos esquemas de control para teleoperación sigue siendo un área de investigación de gran interés porque se busca adaptar los sistemas a entornos de dinámicas más complejas (como es el caso de los entornos submarinos) [2]. Asimismo, se procura reducir el impacto negativo en desempeño y estabilidad producido por retardos en el intercambio de información entre maestro y esclavo. Una cuestión adicional es la necesidad de telepresencia o que el operario perciba adecuadamente la interacción entre el esclavo y el entorno lejano [3]. Esta realimentación propia del control bilateral es un recurso que ayuda al usuario a discernir la mejor forma de manipular el maestro en función de los resultados que está obteniendo con el esclavo [4].

Un esquema de control bilateral que cumple con la mayoría de las condiciones anteriormente descritas es el algoritmo que se basa en la convergencia de estados del sistema de teleoperación. Garantiza la estabilidad del sistema cuando existen retardos de tiempo pequeños y constantes entre la comunicación del maestro y el esclavo, además de otorgar al usuario un nivel de telepresencia apropiado [5]. Al igual que otras instituciones en el mundo, la PUCP también está incursionando en la mejora y desarrollo de esquemas de control basados en la convergencia de estados. Sin embargo, la universidad no cuenta con una plataforma de teleoperación bilateral en la que probar los nuevos algoritmos.

Es notable resaltar que la investigación sobre sistemas teleoperados tiene índices de recurrencia muy bajos en el Perú. Esto se ve reflejado en la base de datos de la plataforma de Acceso Libre a la Información Científica para la Innovación (Alicia) perteneciente al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (Concytec) donde los resultados obtenidos para el factor de búsqueda “teleoperación” son escasos: únicamente cinco disponibles. Por lo general, solo figuran trabajos de investigación que implementan sistemas de propósito aplicativo específico con robots (dispositivos remotos) conectados a servidores web que usan Internet para comunicarse con interfaces virtuales (dispositivos locales) [6].

Es decir, los sistemas teleoperados que se implementan en Perú no consideran algún esquema de control bilateral (puesto que no existe reflexión de fuerzas) y la telepresencia de la plataforma recae exclusivamente en realimentación visual sobre las condiciones del entorno lejano o en el uso de sensores infrarrojos para recolectar dicha información [7] - [10]. Las investigaciones tampoco se orientan al diseño de plataformas teleoperadas aplicables al desarrollo de nuevos algoritmos de control. Entonces, resulta de gran interés contribuir al desarrollo del importante sector de teleoperación bilateral aún incipiente en nuestro país.

1.2 Estado del arte

Desde hace décadas, los sistemas teleoperados han sido objeto de estudio por su utilidad para realizar actividades en zonas a las que el humano no puede acceder, ya sea por limitaciones geográficas o porque implican situaciones de peligro y riesgo. Las primeras aplicaciones registradas de estos sistemas datan desde el uso de pinzas para manipular a distancia objetos con elevada temperatura o que emitían altos niveles de radiación. En particular, por los años 40, el crecimiento de la industria energética radioactiva desencadenó el interés en desarrollar mecanismos de teleoperación más especializados, seguros y precisos [1], [3].

Alrededor de los años 70, tuvo lugar una importante innovación en el control de los sistemas operados a distancia. El control analógico comenzó a ser reemplazado por uno digital, lo que posteriormente añadió mejores prestaciones en cuanto a gestión de datos

registrados y conectividad a red. La siguiente década estuvo marcada por el apogeo de la robótica automatizada en la industria. Sin embargo, se presentaron complicaciones cuando se quiso extender el uso de dispositivos autónomos a diversas áreas. Es así que en los años 90, la teleoperación resurge como una alternativa fiable para aplicaciones variadas en medicina, educación, construcción, entretenimiento y seguridad, entre otros campos [1].

Actualmente, también se desarrollan plataformas de teleoperación bilateral con fines didácticos o de investigación. Para tales casos, existe la posibilidad de recurrir a hardware ya existente en las instituciones que realizan la investigación o hardware que se encuentre disponible comercialmente. No obstante, cuando se trabaja con manipuladores adquiridos, surge la necesidad de explorar el funcionamiento del dispositivo para poder integrarlo adecuadamente al sistema teleoperado [1]. Si se quiere probar algoritmos de control bilateral, sería recomendable que la implementación del sistema teleoperado considere componentes que favorezcan el modelamiento de los manipuladores. Típicamente, el proceso de modelar los elementos de la plataforma suele complicar el trabajo de los desarrolladores de algoritmos [3].

Como ejemplo de lo mencionado, en 2003, Azorín comprobó la validez de su esquema de control por convergencia de estados en una plataforma que previamente se había fabricado en la universidad donde realizó su tesis doctoral. El sistema teleoperado constaba de un solo grado de libertad (GDL) por manipulador e implementaba el nuevo algoritmo mediante una computadora, conexiones alámbricas y el software *Simulink*. El diseño mecánico incluía un volante de inercia en el dispositivo esclavo para suavizar su dinámica rotativa e impedir oscilaciones de velocidad angular. Los grados de libertad se implementaron mediante motores de corriente continua (CC) sin escobillas (*brushless*) de la marca *Premotec*. Esos motores tenían componentes para linealizar directamente su comportamiento rotacional y medir las corrientes de fase y el ángulo de cada articulación [5].

La tesis doctoral de Bogado, en 2007, es otro caso de desarrollo de plataformas para probar esquemas de control. Esta investigación, en particular, se enfocaba en diseñar una plataforma avanzada adaptable a condiciones de trabajo industrial y diversos

algoritmos y tecnologías de control. Su plataforma usó un sistema GRIPS fabricado por Kraft Telerobotics Inc. e integrado por los manipuladores con mecanismos de reflexión de fuerzas incorporados gracias al empleo de motores AC bifásicos. Tanto el esclavo como el maestro contaban con seis GDL, pero solo el primero tenía sensores de fuerza por cada articulación. El diseño de la plataforma presentó diversas opciones para interconectar y controlar los manipuladores. Entre estas, figuraba el uso del protocolo USB y una computadora como intermediario entre los dispositivos para así incrementar la capacidad de análisis de datos sobre la dinámica del sistema. Alternativamente, se podía aplicar el protocolo *Serial Peripheral Interface* (SPI) para relacionar directamente las tarjetas electrónicas del maestro y el esclavo, o, mediante Internet, se podía conectar al maestro con un manipulador esclavo externo al sistema [1].

Por otro lado, para probar su metodología de diseño de sistemas teleoperados con dinámica no lineal, en 2015, Tafur empleó un dispositivo *Phantom Omni*, comercializado por SensAble Technologies Inc., como manipulador maestro y desarrolló por sí mismo el manipulador esclavo. Era posible aplicar fuerza al maestro hasta en tres GDL diferentes y el puerto Fire Wire IEEE-1394 del *Phantom* se conectó alámbricamente a una computadora y garantizaba una comunicación serial de alta velocidad. Al igual que Azorín, la plataforma emplea el software Simulink para implementar el control de este manipulador. Con respecto al diseño del esclavo, se procuró mantener una estructura ligera con tres GDL cuyas posiciones angulares fueran medidas por encoder digitales. Asimismo, los actuadores escogidos fueron motores DC sin escobillas con mecanismos de reducción. Al diseñar el sistema en conjunto, se recurrió a sensores de fuerza para monitorear el desplazamiento de ambos manipuladores y la interacción del esclavo con el entorno [3].

Actualmente, el procedimiento de desarrollo de plataformas teleoperadas se ha simplificado al punto de que la producción no debe ser necesariamente a escala industrial o considerando manipuladores de grandes dimensiones. Mediante el uso de tecnologías de fabricación como la impresión 3D, el desarrollo y estudio de sistemas teleoperados es mucho más accesible que en años previos. Investigaciones como las de Gandarias y otros, en 2016, siguen el lineamiento de emplear plataformas virtuales *open source*, por lo que sus archivos con el diseño mecánico y el código necesario para programar el controlador del sistema están disponibles gratuitamente en repositorios de

Internet como GitHub [11]. Esta información se puede usar para replicar los diseños existentes o como referencia para crear plataformas de prueba mucho más adaptadas a las necesidades de la investigación.

Paralelamente, el trabajo de Saito y otros, en 2019, figura como evidencia del contraste que puede existir entre la simulación de un algoritmo de control y los resultados en la implementación real. Dicha investigación pretendía desarrollar un método que use controladores de velocidad para la realimentación háptica de una plataforma de teleoperación bilateral. La plataforma experimental contaba con un motor EC de cuatro polos para el maestro y otro para el esclavo, cuyas posiciones angulares eran determinadas por encoders. Tanto la simulación como las pruebas experimentales mostraron que el seguimiento de posición entre manipuladores era muy preciso. Sin embargo, hubo discrepancias en los resultados sobre las respuestas dinámicas del maestro y el esclavo. Mientras la simulación verificaba que el sistema con el controlador propuesto se comportaba conforme a lo esperado, las gráficas de la plataforma real mostraban la presencia de fuerzas de operación no deseadas cuando el maestro no tenía carga. De esta manera, se pudo constatar la necesidad de mejoras relacionadas al ancho de banda de la fuerza de reacción del observador y la frecuencia característica del controlador [12]. Esto reafirma la importancia de pruebas experimentales como complemento de cualquier simulación.

Al diseñar una plataforma de teleoperación bilateral, también se consideran cuestiones como garantizar la mayor telepresencia posible en el sistema. Uno de los factores influyentes en tal condición es el mecanismo de transmisión de movimiento entre el motor eléctrico y el eslabón con los que se implementa cada GDL. Entre los mecanismos actualmente disponibles se destaca el denominado *friction drive* que implica el uso de materiales con alta rugosidad ubicados en superficies estratégicas de la articulación. Cuando el operador ejerce movimiento en el dispositivo háptico, hace girar una pieza cuya rotación genera fricción y el consiguiente desplazamiento de otra pieza (acoplada al eje del motor) para transmitir la cinética al resto del manipulador. Si bien este mecanismo es de gran robustez, la fricción implicada conlleva a una disipación extra de energía y reduce la eficiencia del sistema. En el desarrollo de sus plataformas teleoperadas, Gandarias y Rose mencionan que es posible la aparición de configuraciones inestables en la plataforma cuando la fuerza normal entre las

superficies rugosas no produce la suficiente fricción para mantener al husillo del motor dentro del rango de movimiento permitido [11], [13].

Otra opción asequible para transmitir movimiento es utilizar un dispositivo *capstan drive*. Este consiste en el enrollado de un hilo resistente, comúnmente hecho de acero, alrededor del eje del motor con el que se implementa el GDL. El extremo libre del filamento es asegurado en el eslabón de modo que, cuando el operador genera torque en la articulación, el hilo se desenrolla progresivamente y el rotor gira. Cuando Rose y otros, en 2014, evaluaron el desempeño de su plataforma *capstan drive*, constataron que si bien este método no acarrea pérdida de energía como el *friction drive* y presenta una mayor linealidad, hace necesario rebobinar con frecuencia el filamento para reducir la inestabilidad del sistema [13]. A esto se añade la variabilidad de rigidez en el cable como resultado de su uso continuo y que, lógicamente, se necesitan diversos mecanismos de cables enrollados en el diseño mecánico para garantizar que la rotación de la paleta sea bidireccional (horaria y antihoraria) [14].

Una alternativa adicional en la transmisión de movimiento es el uso de mecanismos de engranajes. En general, permiten transferir el desplazamiento angular entre dos ejes y consisten en ruedas cuyas superficies dentadas son adyacentes y de iguales proporciones para que cuando gire una, la otra la imite en sentido contrario. La potencia puede ser transmitida en dos sentidos y de forma más estable que con poleas y cadenas, puesto que no son factibles los resbalamientos a menos que los dientes de los engranajes se encuentren muy desgastados. Si los ejes a relacionar se ubican separadamente y no se dispone de espacio suficiente para incrementar el tamaño de los engranes, es recomendable adicionar correas o cadenas dentadas al sistema. Este tipo de mecanismos también añade componentes de elevada fricción a la plataforma [15]. Un ejemplo de plataforma teleoperada con este mecanismo es la implementada por Katz en 2016. Los manipuladores contaban con tres GDL y cada articulación involucraba un motor *brushless* cuya posición angular era medida por un encoder digital de alta precisión [16].

Un panorama general del estado del arte puede consultarse en la Tabla 1.1. Como se observa, las plataformas de pruebas presentadas cuentan con diversos mecanismos de transmisión de movimiento y sirvieron para implementar variados esquemas de control.

Casi todos estos sistemas tienen componentes propiamente fabricados para una investigación en específico. Es decir, muchos parámetros de diseño se adecuaron a los requerimientos de las pruebas involucradas en cada investigación. Al igual que estos ejemplos, en un eventual trabajo de tesis se buscará adaptar el diseño de la plataforma a las características del esquema de control que se quiere probar: la convergencia de estados.

Tabla 1.1. Cuadro comparativo resumen del estado del arte

Autor de Investigación	Tipo de plataforma de pruebas usada	Mecanismo de transmisión de movimiento	¿Usó sensores de fuerza?	Esquema de control bilateral puesto a prueba
Azorín	Fabricada previamente a la investigación	No especificado	No	Bilateral basado en la convergencia de estados
Bogado	Parcialmente fabricada durante la investigación: ambos manipuladores fueron comprados.	No especificado	Sí	Bilateral basado en la convergencia de estados
Tafur	Parcialmente fabricada durante la investigación: el manipulador maestro fue comprado.	Rodamientos y correas dentadas	Sí	Bilateral basado en la convergencia de estados
Gandarias y Gómez	Fabricada durante la investigación	<i>Capstan Drive</i>	Sí	Bilateral de posición-posición y fuerza-posición
Saito y otros	Fabricada durante la investigación	No especificado	No especifica	Bilateral basado en control híbrido (fuerza y velocidad)
Rose y otros	Fabricada durante la investigación	<i>Friction Drive</i>	No especifica	No especificado
Katz	Fabricada durante la investigación	Engranajes y correas dentadas	No	Bilateral de posición-posición

1.3 Justificación

Aunque en el desarrollo de plataformas de pruebas se puede emplear hardware de fabricación ajena al curso de la investigación, existen ventajas si parte de los manipuladores se diseña y manufactura en el proceso. Por ejemplo, se pueden obtener plataformas adaptadas a las necesidades del esquema de control que se quiere probar [3]. También figura la posibilidad de incluir elementos que mejoren la eficiencia energética del sistema, como es el caso de usar motores *brushless* en los GDL [11]. En contraste, cuando se trabaja con manipuladores adquiridos, surge la necesidad de explorar el funcionamiento del dispositivo para integrarlo adecuadamente al sistema teleoperado [1]. Asimismo, se plantea el uso de tecnologías de fabricación aditivas como la impresión 3D para producir el hardware. Esto crea la oportunidad de

estandarizar un proceso fácilmente replicable para construir plataformas que aplicar en posteriores investigaciones. Como parte de un proyecto en la PUCP que busca desarrollar un nuevo algoritmo de control bilateral para entornos submarinos, es necesario diseñar una plataforma de teleoperación en la que realizar la etapa de pruebas en superficie terrestre.



CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Una vez que se ha estudiado la problemática, se recurre a la revisión de literatura correspondiente para documentar los conceptos teóricos necesarios en el desarrollo de la solución. Luego, se sigue una metodología de diseño que permita estructurar y relacionar adecuadamente la información recopilada. Para el presente trabajo de bachillerato, es recomendable analizar la VDI 2206 ya que la plataforma de pruebas corresponde a un sistema multidisciplinario con dominio mecánico, electrónico y de control. Como resultado de aplicar el método, en una investigación posterior se perfilará una alternativa de solución óptima que deberá ser implementada [19].

2.1 Visión general

Las plataformas de pruebas de algoritmos de teleoperación bilateral deben facilitar la implementación de los esquemas de control respectivos. Entonces, es necesario conocer a profundidad el algoritmo para adaptar las características de diseño de la plataforma a la etapa de pruebas. De esta manera, se eligen elementos de hardware y software con mejores prestaciones en cuanto a eficiencia, transmisión de movimiento y telepresencia para el operador. A la par, es imprescindible que durante el planteamiento de posibles soluciones se tomen en consideración los requerimientos de diseño adicionales previamente establecidos. Considerando que, en su forma más simple, el sistema teleoperado consta de dos manipuladores cuyas posiciones angulares deben converger en todo momento, la plataforma requiere precisión y rapidez de funcionamiento.

2.2 Marco teórico

En primer lugar, se procederá a definir formalmente un sistema teleoperado y algunos parámetros que garantizan el buen desempeño de este. Posteriormente, se detallarán los principales algoritmos de control bilateral desarrollados previamente al de convergencia de estados. Por último, se hará una descripción del algoritmo de control vectorial seleccionado para gobernar el movimiento de los motores *brushless*.

2.2.1 Sistemas de teleoperación

En lo básico, un sistema de teleoperación está conformado por el operador humano, un manipulador maestro situado en el área local del usuario, un manipulador esclavo ubicado en la zona remota donde se quiere realizar acciones, el entorno remoto con el que interactúa el esclavo y la línea de comunicación entre el maestro y el esclavo. El funcionamiento del sistema se resume en que el operador manipula el dispositivo maestro y esos movimientos son transmitidos al esclavo para que ejecute un comportamiento lo más idéntico posible al del maestro. La característica bilateral se expresa en que los parámetros dinámicos de la interacción entre esclavo y el entorno se realimentan hacia el maestro para indicar al operador la efectividad de los comandos enviados. El manejo de sistemas como este implica el uso de un algoritmo de control para estabilizar el sistema y garantizar que se asemejen las posiciones del maestro y el esclavo. Sin embargo, se debe lidiar constantemente con problemas como los retardos de comunicación y la deficiente telepresencia del operador en el entorno remoto.

Los retardos de comunicación se deben principalmente a dos causas: a los parámetros físicos del medio en el que se transmite la información y al tiempo de procesamiento empleado por el controlador. Estos retardos pueden causar inestabilidad y error en el sistema porque la información sobre el movimiento de un manipulador llega al otro en un instante para el cual ya no se garantiza que la data corresponda a la situación real. Entonces, se generan progresivamente leyes de control que no son del todo efectivas para asemejar la posición del maestro y el esclavo.

Se denomina telepresencia o transparencia a la característica de un sistema teleoperado que le permite al usuario percibir adecuadamente la interacción entre el dispositivo esclavo y su entorno lejano. En su forma más simple, puede tratarse de realimentación visual: una cámara instalada cerca al esclavo para mostrar el desplazamiento del manipulador. Como una alternativa más compleja, se implementa realimentación dinámica para que las fuerzas de interacción sean transmitidas tangiblemente al usuario a través de la oposición al movimiento del maestro. El operario necesitará aplicar fuerzas mayores a las de oposición para desplazar el manipulador cercano y de esa forma tendrá una idea mucho más aproximada sobre la efectividad de sus acciones en la ejecución de la tarea a distancia [3] y [5].

2.2.2 Algoritmos de control bilateral

Numerosos esquemas de control bilateral han sido propuestos como posibles soluciones a los mencionados problemas de retardo y telepresencia. Se procederá a describir los más resaltantes.

- Control basado en pasividad: Fue una propuesta de Anderson y Spong en 1989. Su principal aporte fue que garantizaba la estabilidad para cualquier valor de retardo. No obstante, el desempeño del modelo no permitía alcanzar un buen nivel de eficiencia. Su funcionamiento era de mayor dificultad y 50% más lento a comparación de otros esquemas. Los autores se basaron en la teoría del cuadripolo y relacionaron la estabilidad con la caracterización de un sistema como pasivo o no. Es pasivo si solo disipa energía y no la incrementa. Cada componente del sistema (operador, maestro, canal de comunicación, esclavo y entorno) está representado por un bloque solo relacionado con los elementos adyacentes, tal como se puede observar en la Figura 2.1. Cuando el bloque de comunicación entre maestro y esclavo deja de ser pasivo a consecuencia de los retardos, el sistema en conjunto se hace inestable. Por lo tanto, se necesita una ley de control que asegure la pasividad del bloque problemático [5].

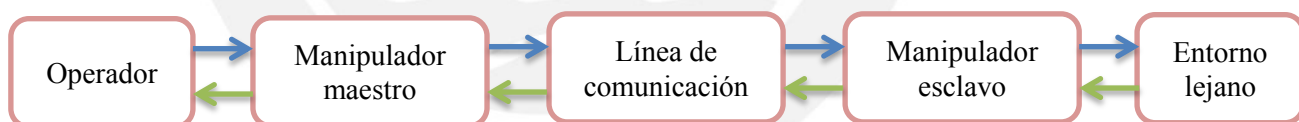


Figura 2.1. Diagrama de bloques de un sistema teleoperado

- Control basado en variables de onda: Lo plantearon Niemeyer y Slotine en 1991. Sugiere reformular el principio de pasividad y realizar la comunicación entre maestro y esclavo mediante lo que llamaron variables de onda. Estas fueron denominadas $u(t)$ y $v(t)$. La primera se transmite desde el maestro hacia el esclavo y la segunda va desde el esclavo hacia el maestro. La pasividad de ambas presenta robustez frente a cualquier retardo en la comunicación, por lo que usarlas favorece la estabilidad del sistema. Dichas variables son definidas en base a otros parámetros dinámicos del modelamiento del sistema, lo que hace posible la

codificación e intercambio de datos de velocidad y fuerza entre ambos manipuladores [5].

- Control acomodaticio compartido: Kim y otros investigadores publicaron este trabajo en 1992. El control del sistema en conjunto depende tanto del control manual realizado por el usuario como del control autónomo en el manipulador remoto. Este último tiene como premisa reducir el impacto de las colisiones que ocurren durante la interacción entre el dispositivo esclavo y el entorno lejano. Dicho objetivo se logra al suavizar las fuerzas de contacto entre ambos elementos para adaptar el esclavo a su entorno restringido. Se obtiene ese ajuste al aplicar el algoritmo de acomodación activa para que los parámetros se adecúen al estado final deseado en el esclavo. El comando de posición del robot se calcula según los valores de fuerzas o pares de contacto registrados en el extremo del manipulador y posteriormente filtrados en bajas frecuencias. Cuando este esquema de control es combinado con reflexión de esfuerzos en el esclavo hacia el maestro, se mejora la estabilidad del sistema y el esquema adquiere bilateralidad. Sin embargo, esta última propuesta no es aplicable para retardos de comunicación mayores a un segundo.
- Control por convergencia de estados: Este esquema fue desarrollado por Azorín en 2003. Es aplicable solo a sistemas que cuenten con retardos pequeños y constantes. También se asume que el operador ejerce una fuerza constante en el manipulador maestro. Con esas condiciones, la convergencia de estados garantiza estabilidad y un adecuado nivel de telepresencia para el usuario. A diferencia de esquemas previos, Azorín propuso emplear un elemento de la teoría de control moderna: ecuaciones de espacio de estados para describir la dinámica de los dispositivos local y remoto. El entorno fue representado según el modelo simplificado de Kelvin: como un amortiguador en paralelo con un resorte, ambos caracterizados por constantes.

Al modelar el sistema en conjunto, se tomó en cuenta todas las posibilidades de interacción entre los elementos operador, maestro, esclavo y entorno. Otra de las principales innovaciones respecto a algoritmos antecesores consistió en aplicar una serie de Taylor de primer orden para representar los retardos en las ecuaciones

diferenciales de su modelo. Esto simplificó los cálculos para despejar las ecuaciones de diseño del controlador. Asimismo, el autor generalizó su método propuesto para un sistema de n -ésimo orden (equivalente a más tener más de un grado de libertad). En general, el esquema de control corresponde al diagrama de bloques de la Figura 2.2.

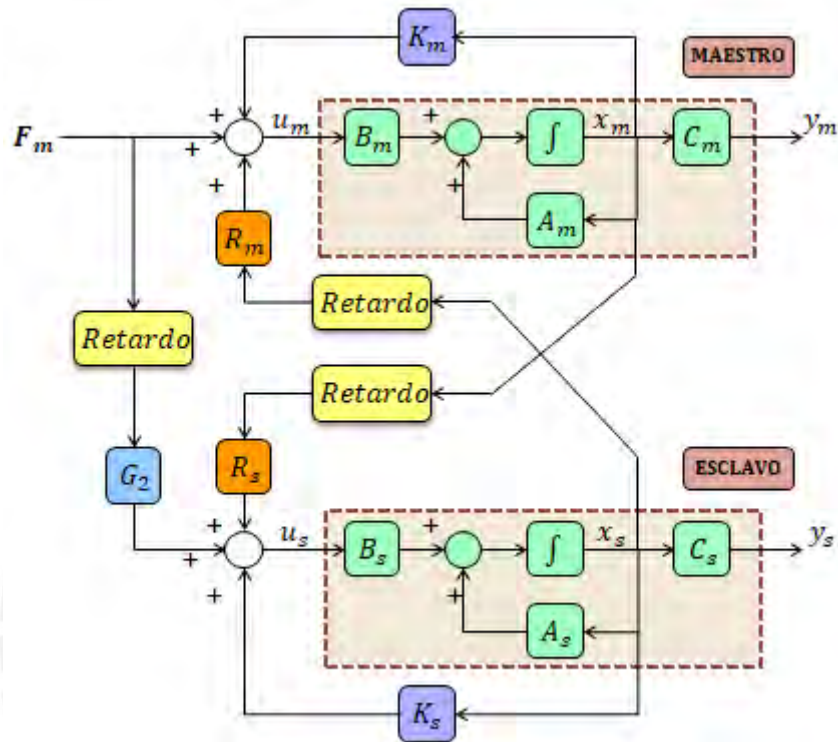


Figura 2.2. Diagrama de bloques del esquema de control por convergencia de estados [5]

A fin de usar el procedimiento planteado por Azorin, es necesario conocer previamente los modelos dinámicos del maestro, el esclavo y el entorno. En otras palabras, se debe contar con los valores de las constantes físicas presentes en las ecuaciones diferenciales. También es imprescindible saber cuánto vale el retardo implicado. Por lo tanto, el diseño del controlador se reduce al cálculo de siete ganancias de control en base a la solución de un sistema de siete ecuaciones. Tres de estas ecuaciones permiten que el error entre esclavo y maestro se convierta en un sistema autónomo y las restantes definen las dinámicas del esclavo y el mencionado error. Los valores que se deben calcular corresponden a elementos de los bloques matriciales G_2 , K_m , K_s y R_s [5].

En un eventual trabajo de tesis, se implementará el esquema de control bilateral por convergencia de estados para validar el funcionamiento de la plataforma de

teleoperación a desarrollar. Esto se debe a que es la base de los algoritmos que se quiere probar en la plataforma y a que también cuenta con mejores prestaciones frente a retardos pequeños y constantes en sistemas de dinámica lineal, en comparación a otros esquemas de control bilateral. Por lo tanto, será de mayor utilidad para comprobar la eficacia del dispositivo fabricado. Cabe resaltar que, pese a su relativa antigüedad, el interés por la convergencia de estados ha resurgido en investigaciones recientes ya que también es aplicable en el desarrollo de nuevos algoritmos de control para sistemas no lineales [3].

2.2.3 Algoritmos FOC para motores *brushless*

Entre los numerosos algoritmos de control disponibles para motores *brushless*, destaca el de tipo vectorial o *Field Oriented Control* (FOC). Sus prestaciones en cuanto a precisión en el movimiento del rotor lo hacen meritorio de usarse en una plataforma de teleoperación bilateral. Al respecto, existe un antecedente en el proyecto desarrollado por el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) donde implementaron un sistema teleoperado con los actuadores *brushless* controlados mediante FOC [16].

Los motores *brushless* también se emplearon en la plataforma de pruebas usada en [5]. Sin embargo, el sistema ya contaba con dispositivos que linealizaban el comportamiento del motor y otorgaban información sobre la posición angular, fuerzas de interacción con el entorno y de realimentación dinámica. Entonces, le fue posible aplicar en su modelamiento de manipuladores las ecuaciones típicas de un motor de corriente continua (CC) con escobillas. Como el algoritmo FOC permite un desempeño versátil para motores *brushless*, se plantea usarlo como medio de alcanzar un control de velocidad que tenga como referencia o *set point* una curva similar a la respuesta cinética de un motor CC. De esta manera, se podría utilizar el mismo modelamiento que en la tesis de Azorín y, con el simple añadido de un elemento integrador, sería posible realizar el control de posición deseado.

Con el FOC, se busca controlar el torque producido por el motor mediante la regulación de corrientes de fase. El objetivo es mantener la perpendicularidad entre la corriente total del motor y el eje del flujo magnético del rotor. De esa forma, el torque

generado siempre será el máximo posible. Implementar este tipo de control consta de cuatro etapas básicas:

- a) Medir la corriente que fluye en el estator: Como se trata de un motor *brushless*, los imanes permanentes se ubican en el rotor y los bobinados se encuentran comúnmente en el estator. Entonces, se debe medir la corriente que circula en cada fase del estator.

- b) Determinar una señal de error en base a la corriente medida y la deseada: Básicamente, se compara la corriente total, que es la suma vectorial de corrientes fasoriales, con la corriente deseada. Esta última es la que forma un ángulo de 90° con el eje del flujo del rotor. La resta de ambas corrientes debería generar una señal de error que ingrese a un controlador para obtener valores que regulen el movimiento del motor. Sin embargo, como cada corriente de fase es una señal sinusoidal variante en el tiempo, se complicaría demasiado el cálculo de las magnitudes reguladoras cada vez que se quiera cambiar la posición del rotor.

Como solución a ese inconveniente, se aplican dos transformaciones a las corrientes medidas por fase (A, B y C). Al principio, estos tres valores escalares se definen como las magnitudes de tres vectores desfasados por 120° entre sí. Posteriormente, se aplica la transformación de Clark y se obtienen una representación de la suma vectorial de esas tres corrientes fasoriales, pero ahora expresadas en otro sistema de referencia rectangular estático: el α - β . Convenientemente, la dirección del eje α coincide con la del eje que corresponde a la fase A.

Luego, se realiza la transformación de Park y el vector resultante en el sistema α - β es expresado en función de un sistema de referencia rectangular rotativo: el d-q. Su velocidad de giro es idéntica a la del rotor, debido a que el eje q coincide con el eje de flujo del rotor. Como resultado, el sistema d-q es estático respecto al rotor en movimiento y la nueva representación de la corriente total ya no varía en el tiempo con respecto al rotor. Es entonces que se puede comparar las componentes d y q de la corriente medida total con los valores deseados según el movimiento que se quiera realizar con el motor.

- c) Amplificar la señal de error: La señal de error obtenida en el paso anterior debe ingresar a un controlador de tipo PI para obtener los valores de tensión que regulen la posición del motor. Se usa un controlador PI porque es el más adecuado en operaciones que involucren magnitudes de corriente. Por un lado, minimiza el error en estado estable y, por el otro, acelera la respuesta del sistema sin dejar de mantener al controlador lo más sencillo posible (ya que no se añade un componente derivativo).
- d) Modular la señal de error para producir los niveles de tensión correspondientes a cada fase del motor: Cuando se tiene los valores que regulen el movimiento del motor, lo siguiente debería ser aplicarlos en las bobinas del estator. No obstante, esas tensiones están expresadas en un sistema de referencia auxiliar que no corresponde al real de la máquina eléctrica. Debido a ello, es necesario realizar un proceso inverso para las transformaciones de Clark y Park con el fin de retornar a las condiciones de trabajo iniciales. Esas magnitudes resultantes permiten generar señales PWM con las que controlar los conmutadores en el driver del motor.

Para realizar las transformaciones directa e inversa de Park, es necesario conocer el ángulo que forma el eje del flujo del rotor con el eje correspondiente a la fase A definida para el motor. Este ángulo θ_d es parámetro de las expresiones trigonométricas involucradas en la transformación de Park [17], [18].

2.2.4 VDI 2206

Tal como se ha mencionado, en el diseño de la plataforma de pruebas se usará como referencia la metodología planteada por la VDI 2206. Fue publicada en el 2002 para complementar normativas previas relacionadas al diseño metódico en general. Esta normativa se recomienda para sistemas mecatrónicos, los cuales involucran dominios de diversas disciplinas de ingeniería, como ocurre en el presente caso. A grandes rasgos, estos lineamientos comprenden análisis macro, micro y modular en procesos. El primero permite determinar las características generales de la plataforma, mientras que los otros inciden en las tareas que el sistema objetivo realizará y las estrategias de implementación de cada una [19]. Las principales etapas del método se presentarán a continuación.

2.2.4.1. Elaboración de la lista de exigencias

En base a la justificación y objetivos planteados al inicio de la investigación, se procede a elaborar la lista de exigencias de la plataforma de pruebas [20]. Para una mejor explicación, se detallan los principales ítems de una lista de exigencias aplicada al sistema teleoperado que se quiere desarrollar.

- **Función principal:** La plataforma deberá permitir la prueba de algoritmos de control bilateral basados en la convergencia de estados. Para implementar el algoritmo se deberá programar la unidad de control relacionada a cada manipulador.
- **Geometría:** A semejanza de las proporciones típicas para implementar un grado de libertad en manipuladores pequeños, tanto el dispositivo maestro como el esclavo ocuparían un volumen máximo de 120mmx120mmx120mm.
- **Cinemática:** El movimiento puede ser de tipo radial y la velocidad en ambos manipuladores dependerá de las fuerzas aplicadas por el operador en el dispositivo maestro.
- **Fuerzas:** El operador deberá percibir una realimentación dinámica radial en el dispositivo maestro en base a las condiciones de operación del esclavo.
- **Señales:** Las señales que transmitan información deberán ser de tipo eléctrico.
- **Control:** El sistema deberá ser capaz de controlar la posición angular del manipulador esclavo en función a la que determine el operario en el dispositivo maestro.
- **Electrónica (hardware):** Los componentes electrónicos deben ser confiables y de bajo consumo energético.
- **Software:** El lenguaje de programación y el IDE escogidos para la unidad de control deberán facilitar la implementación del algoritmo de control bilateral a probar en la plataforma.
- **Comunicaciones:** Con el fin de reducir el impacto de los retardos en el desempeño de la plataforma, se puede usar una comunicación alámbrica entre los manipuladores.
- **Ergonomía:** Los manipuladores deberían tener un diseño mecánico simple y cómodo de usar durante las pruebas.

- **Fabricación:** Para incrementar la reproducibilidad de la plataforma, la estructura mecánica de los manipuladores puede utilizar impresión 3D.
- **Uso:** Los manipuladores deberán ser funcionales en ambientes terrestres.

2.2.4.2. Elaboración de la estructura de funciones

Se parte de la previa lista de exigencias para disgregar el problema de diseño y dividirlo en cuestiones parciales más sencillas de analizar y resolver. Como primer paso, se realiza una abstracción del problema general mediante la representación de los elementos del sistema como cajas negras con entradas y salidas particulares. La naturaleza de esos parámetros puede corresponder a señales, energía o materia. Posteriormente, se elabora una secuencia de operaciones que involucre a los subsistemas contenidos en las cajas negras para implementar el proceso general. Por último, se construye una estructura de funciones adecuada para el sistema completo [21].

2.2.4.3. Elaboración de la alternativa de solución óptima

Una vez que se tiene la estructura de funciones, el siguiente paso es evaluar las posibles soluciones para implementar cada una de las tareas descritas. Posteriormente, estas alternativas deben combinarse en una matriz morfológica para obtener un número de potenciales productos que cumplan con los requerimientos y tengan óptimas prestaciones. Como etapa final, se emplean criterios técnicos y económicos para evaluar la pertinencia de cada alternativa de solución propuesta y determinar cuál se ajusta mejor a los requerimientos de diseño [22].

2.2.4.4. Elaboración del diseño definitivo

En base a la alternativa de solución óptima, se desarrollan los componentes del diseño definitivo. En primera instancia, el diseño de la plataforma se puede disgregar en los tres dominios característicos: mecánico, electrónico y de control. Sin embargo, como se trata de un sistema multidisciplinario, las características de cada dominio no pueden ser totalmente independientes entre sí. Por ello, será recurrente que estos tres elementos se diseñen en paralelo.

2.2.4.5. Validación del diseño definitivo

Con el diseño terminado, se procede a verificar que sus características cumplan con los requerimientos y condiciones de trabajo preestablecidas al inicio de la investigación. Es posible hacer primero una validación por dominios y posteriormente evaluar el funcionamiento del sistema en conjunto. Si los objetivos planteados en un eventual trabajo de tesis se limitan al diseño de la plataforma, la validación del mismo solo contará con simulaciones en software [23].



CONCLUSIONES

Se concluye que es necesario y pertinente diseñar una plataforma teleoperada para la etapa de pruebas en el desarrollo del nuevo algoritmo de teleoperación bilateral basado en convergencia de estados que realiza la PUCP. Esto permitiría obtener resultados de validación más completos y se facilitaría la implementación del nuevo algoritmo en la plataforma de pruebas. En base a la literatura revisada, será posible realizar un diseño acorde a los requerimientos de la problemática.

Del estado del arte, se infiere que el mejor mecanismo de transmisión de movimiento sería un sistema de engranajes. Esto se debe a que no presenta inestabilidad ni tanta dificultad de diseño o implementación como las otras opciones evaluadas. Siguiendo con el diseño mecánico, es altamente recomendable el uso de tecnologías de fabricación aditivas para permitir una mayor reproducibilidad del diseño en futuras investigaciones similares. También se apertura la opción de compartir el diseño en repositorios digitales y hacer más accesible el estudio de sistemas teleoperados.

Sobre el diseño electrónico, se debe elaborar un circuito que permita la aplicación del algoritmo FOC. Entre lo más resaltante, se debe poder medir las corrientes de fase del motor *brushless*. Asimismo, se requiere la generación de una señal PWM con la que controlar interruptores de potencia para cada fase del motor.

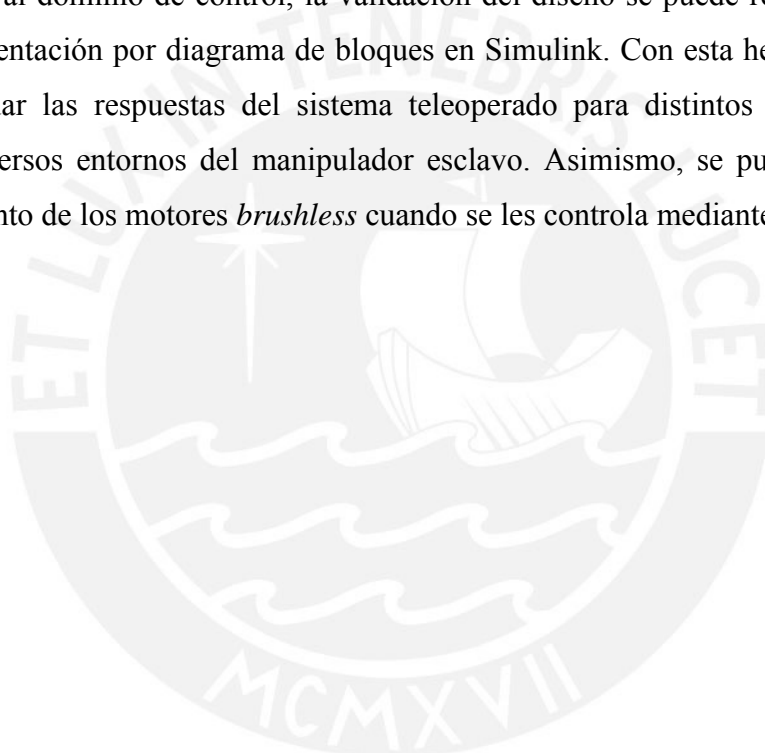
Respecto al diseño de control, deben calcularse las ganancias de los tres controladores PI que integran el FOC y las siete ganancias correspondientes a la convergencia de estados. Los algoritmos de control involucrados en el sistema teleoperado deberán implementarse en una unidad de control distinta para cada manipulador. Por lo tanto, se debería desarrollar un código para maestro y esclavo por separado.

Finalmente, para la validación del sistema diseñado se debería recurrir tanto al uso de software como a una eventual implementación de la plataforma de pruebas. De esta forma se verifica la correcta integración de los dominios desarrollados con la metodología VDI 2206.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Ya que será preciso elaborar un diseño mecánico para los manipuladores, se sugiere emplear la herramienta de software Solid Works para garantizar un correcto uso del material que se proyecte emplear en la fabricación. Esto comprende un análisis por elementos finitos que realiza el mismo programa y examina los esfuerzos aplicados en diversos puntos de la estructura que se está construyendo [24]. Así se obtiene una validación predictiva del diseño mecánico previa a la manufactura por impresión 3D.

En cuanto al dominio de control, la validación del diseño se puede realizar a través de la implementación por diagrama de bloques en Simulink. Con esta herramienta será posible evaluar las respuestas del sistema teleoperado para distintos parámetros de control y diversos entornos del manipulador esclavo. Asimismo, se puede simular el comportamiento de los motores *brushless* cuando se les controla mediante FOC.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Bogado, “Control bilateral de robots teleoperados por convergencia de estados”, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
- [2] L. Wang, C. Wang, W. Wang y C. Wang, "A Novel Hybrid Control Method for the Underwater Manipulator", *2008 International Workshop on Education Technology and Training & 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing*, Shanghai, 2008, pp. 790-794.
- [3] J. Tafur, “Metodología de Diseño y Análisis de Sistemas Teleoperados Considerando Dinámica No Lineal”, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [4] K. Zarei-nia, “Haptic-Enabled Teleoperation of Hydraulic Manipulators: Theory and Application”, tesis doctoral, Universidad de Manitoba, 2011.
- [5] J. Azorín, “Control bilateral por convergencia de estados de sistemas teleoperados con retardos en la transmisión”, tesis doctoral, Universidad Miguel Hernández de Elche, 2003.
- [6] “Buscar: teleoperación”, *ALICIA (Acceso Libre a Información Científica para la Innovación)*, Disponible en:
<https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Search/Results?lookfor=teleoperaci%C3%B3n&type=AllFields>.
[Accedido: 26-03-2020]
- [7] P. Lovón, “Desarrollo de una Plataforma en Android para Teleoperación de un Sistema Robótico en Seguridad de Empresas y Almacenes”, tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2019.
- [8] R. Canelo Cervantes, M. Vera Masías y R. Palomares Orihuela, “Diseño e implementación de un robot híbrido teleoperado con Simulink y un web server embebido en Raspberry PI”, *Perfiles de Ingeniería*, vol.12, no. 12, pp. 167-177, 2016.
- [9] B. Bravo y J. Villegas, “Diseño e implementación de un prototipo de brazo robótico (4 GL) teleoperado para manipulación de sustancias tóxicas asistido con visión artificial y redes neuronales para laboratorios farmacéuticos”, tesis de grado, Universidad Católica de Santa María, 2017.
- [10] P. Mendoza, “Perforadora de rocas teleoperada para la minería profunda, con control autónomo del brazo hidráulico en un grado de libertad”, tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2017.
- [11] J. M. Gandarias, J. M. Gómez, and S. Akbari, “Diseño y uso de una paleta háptica para prácticas de teleoperación con Simulink”, *XXXVII Jornadas de Automática de la CEA*, Madrid, 2016.
- [12] Y. Saito, S. Shimmyo, T. Nozaki and K. Ohnishi, "A Controller Design Method of Bilateral Teleoperation for Velocity Control Driver," *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 3585-3590.
- [13] C. G. Rose, J. A. French and M. K. O'Malley, "Design and characterization of a haptic paddle for dynamics education," *2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, Houston, TX, 2014, pp. 265-270.
- [14] J. Sabater, “Desarrollo de una interfaz kinestésica paralela y experimentación en control de sistemas hápticos y teleoperados”, tesis de grado, Universidad Miguel Hernández de Elche, 2003.
- [15] C. Ayala, “Propuesta de Mejora del Captador Parabólico Solar (CAPASOL)”, tesis de grado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán, 2008.

- [16] B. Katz, “A low cost modular actuator for dynamic robots”, tesis de maestría, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
- [17] D. Wilson, *Field Oriented Control of Permanent Magnet Motors*. [MP4]. Texas Instrument. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=cdiZUszYLiA>. [Accedido: 23-01-2020]
- [18] K. Chau, *Electric vehicle machines and drives. Design, analysis and application*, 1st ed. Hong Kong: IEEE, Wiley, 2015.
- [19] J. Gausemeier and S. Moehringer, “VDI 2206- A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems”, *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 35, no. 2, pp. 785-790, 2002.
- [20] B. Barriga, “Comprensión de la solicitud”, en *Métodos de diseño en ingeniería mecánica*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2016.
- [21] B. Barriga, “Estructura de funciones”, en *Métodos de diseño en ingeniería mecánica*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2016.
- [22] B. Barriga, “Concepto de solución”, en *Métodos de diseño en ingeniería mecánica*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2016.
- [23] B. Barriga, “Proyecto definitivo”, en *Métodos de diseño en ingeniería mecánica*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2016.
- [24] SolidWorks Education, *Introducción a las aplicaciones de análisis de movimiento con SolidWorks Motion. Cuaderno de trabajo del estudiante*, Concord, Massachusetts, USA: Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. 2010.