

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Eléctrica

Diseño de un controlador robusto para un sistema de flotación magnética de una esfera

Joao De Mata Andres Sirrizzotti

Tutor Ing. Eléctrica: Prof. Pedro Teppa.

Caracas, noviembre de 2021.

Derecho de autor

Quien suscribe, en condición de autor del trabajo titulado “Diseño de un controlador robusto para un sistema de flotación magnética de una esfera”, declaro que: cedo a título gratuito, y en forma pura y simple, ilimitada e irrevocable a la Universidad Metropolitana, los derechos de autor de contenido patrimonial que me corresponde sobre el presente trabajo. Conforme a lo anterior, esta cesión patrimonial sólo comprenderá el derecho para la Universidad de comunicar públicamente la obra, divulgarla, publicarla o reproducirla en la oportunidad que ella lo estime conveniente, así como, la de salvaguardar mis intereses y derechos que me corresponden como autor de la obra antes señalada. La Universidad en todo momento deberá indicar que la autoría o creación del trabajo corresponde a mi persona, salvo los créditos que se deban hacer al tutor o a cualquier tercero que haya colaborado o fuere hecho posible la realización de la presente obra.

Autor...Joao De Mata...

C.I....27.770.313.....

En la ciudad de Caracas, a los...25... días del mes de...noviembre... del
año...2021...

Yo, **(Nombre del tutor)**, considero que el Trabajo Final titulado “Diseño de un controlador robusto para un sistema de flotación magnética de una esfera” Elaborado por el ciudadano

Joao De Mata

Para optar al título de:

Ingeniero Electricista

Reúne los requisitos exigidos por la Escuela de Ingeniería Mecánica e Ingeniería de Producción de la Universidad Metropolitana, y tiene méritos suficientes para ser sometido a la presentación y evaluación exhaustiva por parte del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Caracas, a los...25... días del mes de...noviembre... del año...2021...

Tutor

Acta de veredicto

Nosotros, los abajo firmantes, constituidos como jurado examinador y reunidos en Caracas, el día *fecha (día, mes y año)*, con el propósito de evaluar el Trabajo Final titulado

Diseño de un controlador robusto para un sistema de flotación magnética de una esfera

Presentado por el ciudadano

Joao De Mata

Para optar al título de

Ingeniero Electricista

Emitimos el siguiente veredicto:

Reprobado____

Aprobado____

Observaciones:_____

(firma)

(firma)

(firma)

Jurado

Jurado

Jurado

TABLA DE CONTENIDOS

Derecho de autor.....	ii
Acta de veredicto	iv
TABLA DE CONTENIDOS	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tablas	viii
Resumen.....	ix
Introducción	11
Capítulo I. Tema de Estudio	14
1.1 Planteamiento del Problema	14
1.2 Objetivos del Estudio	15
1.3 Delimitaciones	16
1.4 Justificación	17
Capítulo II. Marco Teórico	18
2.1 Marco teórico.....	18
2.1.1 Sistema de control	18
2.1.2 Teoría electromagnética	19
2.2 Marco conceptual.....	19
2.2.1 Sistemas de control.....	19
2.2.2 Controlador	20
2.3 Marco Referencial	21
2.3.1 Controlador	21
Capítulo III. Marco Metodológico	22
3.1 Tipo de investigación.....	22
3.2 Variables de investigación	22
3.3 Hipótesis	23
3.4 Fases de desarrollo	23
Capítulo IV. Resultado y Discusión	26
Conclusiones.....	27

Recomendaciones	28
Bibliografía	29
Apéndices	31

Lista de Figuras

Ilustración 1. Lazo elemental de control.....	12
Ilustración 2. Elementos de un sistema de control.....	19
Ilustración 3. Diagrama de la red de vínculos temáticos.....	29

Lista de Tablas

Esta sección de aquí corresponde a la lista de tablas que se emplearan en el proyecto

Resumen

Diseño de un controlador robusto para un sistema de flotación magnética de una esfera.

Autor: Joao De Mata

Tutores: Pedro Teppa

Caracas, noviembre del 2021

Este proyecto consiste en el diseño de un controlador robusto para el sistema de levitación magnética de una esfera que presenta incertidumbres paramétricas en sus valores internos, utilizando un modelo en variables de estado. Para ello se definen cuáles son los términos variables del sistema con sus respectivos intervalos, y se plantea un modelo matemático que describa el funcionamiento de este; con el cual se desarrollan todos los cálculos necesarios para el diseño de los distintos elementos del controlador (actuador, sensor, y observador). Por medio de simulaciones se puede comprobar la factibilidad de este diseño al observar su eficacia y desempeño en distintos puntos de operación; y observar que, en todos estos casos, el controlador regule el sistema de tal manera que se mantenga en un régimen de estabilidad y presente un error estacionario ínfimo de tal manera que el resultado esperado por el operador sea lo más cercano posible al resultado real del sistema. La metodología de diseño robusta, a diferencia de un diseño mas tradicional, le permite al controlador la posibilidad de regular el sistema en distintos puntos de operación que no siempre dependen de la intervención humana; por ello, el desempeño de este tipo de controlador es mayor al del resto.

Palabras claves: Control Robusto, Sistema de Flotación Magnética, Controlador con variables de Estado.

Introducción

Todo sistema real cuenta con valores, tanto internos como externos, que influyen directamente en la operación del mismo; la temperatura ambiente influye en la cantidad de tiempo necesario para que un sistema de refrigeración alcance la temperatura deseada, el peso en un ascensor determina cuenta fuerza debe realizar el mismo, la velocidad de giro del rotor en un generador eléctrico es proporcional a la cantidad de energía suministrada, etc. Un controlador procesa la “información de funcionamiento” suministrada por la planta y se encarga de que este opere de la forma deseada por el usuario. Sin embargo, en las plantas reales estos valores internos o externos tienden a variar con respecto a los nominales; y en algunos casos, terminan generando puntos de operación donde la efectividad del controlador se ve disminuido o inclusive, se desestabiliza.

El objeto de este trabajo de investigación consiste en desarrollar un controlador que tenga un margen de operación que le permita actuar ante las distintas variaciones del sistema, conocidas como incertidumbres paramétricas. Este tipo de diseño recibe el nombre de controlador robusto; y se utilizara como planta un sistema que permite la suspensión de una esfera metálica en un campo electromagnético en la posición deseada por el operador.

Para lograr esto, es necesario definir todos los parámetros inciertos que influyen en el sistema con sus respectivos intervalos; con ellos se modelara matemáticamente el sistema y se calcularan los puntos de operación donde se asegure la estabilidad del mismo. Posteriormente se desarrollarán los distintos elementos del controlador para finalmente, por medio de simulaciones, comprobar la factibilidad del diseño.

El presente trabajo está compuesto por capítulos dispuesto de la siguiente forma:

- Capítulo I: Esta presenta la introducción del trabajo, donde se desarrolla el planteamiento del problema, con sus objetivos, alcance y delimitaciones.
- Capítulo II: Se plantea el Marco Teórico, el cual contiene la descripción de todos los términos, teorías y elementos necesarios para el desarrollo del trabajo.
- Capítulo III: Expone la metodología empleada para el desarrollo del trabajo de investigación. En este, se indican el tipo de investigación, el alcance del mismo, las variables involucradas, la hipótesis planteada y las fases de desarrollo que hacen posible el desarrollo del trabajo.
- Capítulo IV: En este capítulo se muestra los distintos cálculos y resultados obtenidos durante todo el proceso de diseño del controlador, a la vez que cuenta con los resultados

finales y la discusión sobre si el diseño presentado cuenta con las características definidas en la hipótesis.

Capítulo I. Tema de Estudio

1.1 Planteamiento del Problema

En la teoría de Control, una noción fundamental es que se puede hacer que una variable física se comporte de una manera establecida, utilizando la diferencia entre el valor actual de la variable y un valor de referencia deseado, hasta alcanzar la correspondencia de las mismas. Esta noción resulta en el lazo de control realimentado elemental de la Fig. 1, el mismo consta de tres componentes: la planta (el sistema a ser controlado), el sensor para medir el valor actual de la salida y el controlador que genera la entrada de la planta.

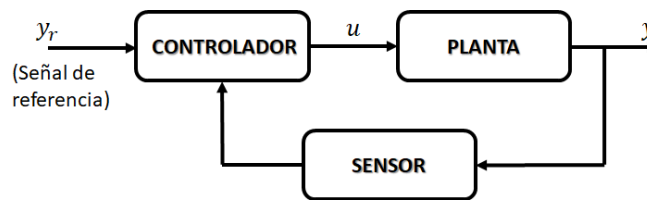


Ilustración 1. Lazo elemental de control.

Fuente: Ogata, 2010

En términos generales, el objetivo de un sistema de control es hacer que la salida y , se comporte de una manera deseada manipulando la entrada u . Un objetivo fundamental consiste en mantener la salida y próxima a un punto de operación, **problema de regulación** o mantener la diferencia $y_r - y$ pequeña para una señal de referencia y_r deseada, **problema de seguimiento**. Mayormente se diseñan estos controladores basándose en el modelo matemático nominal del sistema.

Sin embargo, ¿qué pasaría si el sistema se ve afectado por una perturbación externa, o alguno de los elementos internos del sistema varía su valor? En muchos casos el sistema perdería su estabilidad o la salida diferiría del valor esperado. Aquí es donde entra la técnica de robustez en el diseño.

Como lo define Teppa (2008), la robustez es la capacidad de una ley de control de asegurar un nivel de invariabilidad en el desempeño de un sistema de control frente a las imperfecciones del modelo (incertidumbre, aproximación, reducción del modelo, entre otros).

En otras palabras; un controlador robusto depende de una cantidad de n variables que, a diferencia de un controlador estándar, no cuentan con un valor fijo (nominal) sino que están definidos dentro de un intervalo de posibles valores. A su vez, este debe de poder mantener el sistema de forma eficiente y estable en el punto de operación seleccionado. Ogata (2010)

Este trabajo de investigación consiste en emplear la técnica de robustez para el diseño de un controlador donde el modelo matemático de la planta cuente con incertidumbres paramétricas en sus valores internos.

La planta que se va a considerar en este trabajo consiste en un sistema de flotación magnética para una esfera. Se hace esta selección, porque se trata de un sistema que además de poseer relevancia práctica, tiene una complejidad inherente (no lineal e inestable a lazo abierto) que va a permitir la validación de la metodología robusta de diseño a desarrollar.

1.2 Objetivos del Estudio

1.2.1 Objetivo General

Realizar el seguimiento asintótico robusto de una señal polinómica para la posición de una esfera de un sistema de flotación magnética con incertidumbre paramétricas, utilizando como base la teoría de control robusto, con la finalidad de diseñar un controlador que pueda proveer un correcto desempeño y estabilidad en este sistema no ideal.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Modelar matemáticamente el sistema de flotación magnética de la esfera, a partir de la teoría de espacio de estados, utilizando variables de estado, para obtener el modelo más acorde a los requerimientos.
2. Seleccionar los parámetros físicos del modelo matemático que se considerarán variantes para el diseño robusto y calcular sus intervalos de estabilidad, a partir de la teoría de sistema de control robusto, para escoger los parámetros apropiados.
3. Diseñar un controlador aplicando la metodología de robustez que pueda proveer un correcto desempeño y estabilidad del sistema aún en la presencia de incertidumbres en los parámetros físicos seleccionados, a partir de la teoría de diseños de controladores, para lograr el mejor controlador.
4. Validar el diseño del controlador simulando cambios en sus parámetros y señales de perturbación, mediante el uso del software “MATLAB” y “SIMULINK”, para comprobar su correcto desempeño.

1.3 Delimitaciones

Originalmente, las técnicas de espacio de estado fueron desarrolladas colocando el énfasis en alcanzar un buen desempeño y no en la robustez. No obstante, la robustez es de fundamental importancia en el diseño de sistemas de control porque todo sistema real de ingeniería es vulnerable a perturbaciones externas y/o ruido de medición, a la vez que siempre hay discrepancias entre el modelo matemático nominal empleado en el diseño y el sistema real.

El presente trabajo busca implementar la técnica de robustez para el desarrollo y diseño de un controlador para una planta específica. Se optó por estudiar un sistema que permite la levitación magnética de una esfera usando

como base el modelo matemático propuesto por Tao y Taur (1995); solo se tendrán en cuenta las incertidumbres de tipo paramétricas.

A su vez, el diseño del controlador robusto se representará adoptando la descripción en variables de estado. Se realizará empleando como herramienta los softwares de Matlab y Simulink, y solo se realizarán simulaciones para la validación de los mismos; no se construirá ningún prototipo del diseño.

1.4 Justificación

El problema de seguimiento aparece en diversas aplicaciones, tales como el control de seguimiento de una trayectoria por un manipulador robótico, lo cual es de gran interés en medicina, por ejemplo, en el caso de los robots quirúrgicos usados en neurocirugía, radiocirugía, ortopedia y cirugía laparoscópica. Igualmente, encuentra aplicación en el control de la trayectoria de navegación en aeronaves y barcos. En el rastreo de señales de radar. En el control de vehículos autónomos en las calles de una ciudad y en el de submarinos y helicópteros no tripulados (Marko et al, 1989; Cavalcanti, 2003; Dorf y Bishop, 2017).

Por otra parte, las técnicas de espacio de estado fueron desarrolladas originalmente colocando el énfasis en alcanzar un buen desempeño y no en la robustez. No obstante, la robustez es de fundamental importancia en el diseño de sistemas de control, porque todo sistema real de ingeniería es vulnerable a perturbaciones externas y ruido de medición y siempre hay discrepancias entre el modelo matemático nominal empleado en el diseño y el sistema actual. (Dorf y Bishop, 2017)

Capítulo II. Marco Teórico

2.1 Marco teórico

En este apartado se explican las leyes y definiciones extraídas de libros de sistemas de control y teoría electromagnética, para sentar las bases teóricas del presente trabajo de investigación.

2.1.1 Sistema de control

Dorf y Bishop (2017) en su libro de sistemas de control moderno define un sistema de control como “una serie de componentes interconectados para lograr un propósito específico”.

Continuando, los sistemas pueden ser del tipo lineal o no lineal. Un sistema lineal según Ogata (2010) es un sistema en el que se puede aplicar el principio de superposición, es decir, la respuesta ante varias entradas se calcula tratando una entrada cada vez y sumando los resultados. Ahora bien, un sistema no lineal es un sistema en el cual no se puede aplicar el principio de superposición. Por tanto, para un sistema no lineal la respuesta a dos entradas no puede calcularse tratando cada entrada a la vez y sumando los resultados. (Ogata, 2010)

Los sistemas de control dependiendo de su conexión se pueden clasificar en: sistemas de control a lazo cerrado y sistemas de control a lazo abierto. A continuación se definen:

Sistemas de control a lazo cerrado: es aquel en el cual se alimenta al controlador con la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la

señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. (Ogata, 2010)

Sistemas de control a lazo abierto: es aquel en el cual la salida no tiene efecto sobre la acción de control, es decir, no se mide ni se realimenta para compararlo con la entrada. (Ogata, 2010)

2.1.2 Teoría electromagnética

El Electromagnetismo es una rama de la Física que estudia y unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos. Ambos fenómenos se describen en una sola teoría, cuyos fundamentos fueron sentados por Faraday y formulados por primera vez de modo completo por James Clerk Maxwell. La formulación consiste en cuatro ecuaciones diferenciales vectoriales que relacionan el campo eléctrico, el campo magnético y sus respectivas fuentes materiales (corriente eléctrica, polarización eléctrica y polarización magnética), conocidas como las ecuaciones de Maxwell. (Osorio, 2007)

2.2 Marco conceptual

El siguiente inciso consiste en la exposición de los conceptos necesarios para el desarrollo de la tesis, a través de la unificación e integración de explicaciones de varios autores.

2.2.1 Sistemas de control

Los elementos básicos de un sistema de control se definen con la convergencia de los autores Martínez (2018) y Ogata (2010), entonces los elementos presentes son: sensor, controlador, actuador y la planta. A

continuación, se conceptualizan cada uno de ellos a excepción del controlador, que será definido más adelante.

Sensor: es un dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, la humedad, etc., en otro tipo de señal. Es decir, éste dispositivo toma una variable de entrada y produce una salida de otra naturaleza.

Actuador: es un dispositivo que transforma la energía hidráulica, neumática o eléctrica para realizar una función que genera un efecto sobre un proceso. El actuador recibe la señal desde un controlador y en función a ella activa un elemento final de control; por ejemplo, una válvula.

Planta: puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular.

2.2.2 Controlador

Un controlador es aquel que tiene la función de comparar la variable de proceso medida de una causa física con un valor de referencia de entrada, de determinar la desviación y de producir una señal de control que reduce el error a un valor aproximado a cero. (Martínez, 2018)

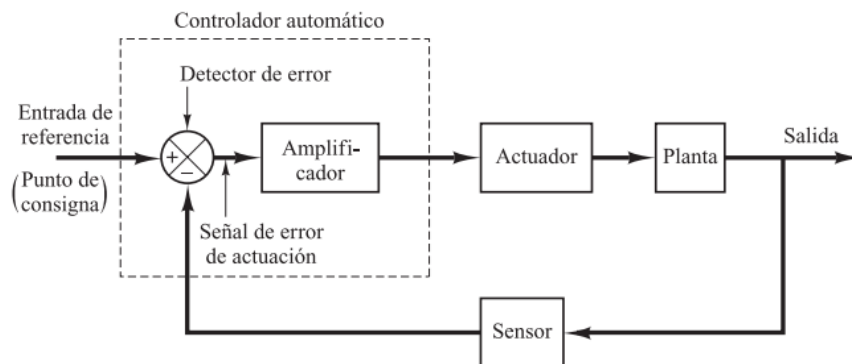


Ilustración 2. Elementos de un sistema de control.

Fuente: Ogata, 2010

2.3 Marco Referencial

El presente punto consiste en la descripción e ilustración de artículos científicos sobre temas que utilizan premisas, conocimientos y tecnologías relacionadas con el objetivo general.

2.3.1 Controlador

El uso de un controlador tiene como objetivo minimizar el tiempo de estabilización, definir un sobre nivel porcentual bajo, y tener un porcentaje de error estacionario cercano a cero. (Daqui, et al. , 2014)

En el paper de Daqui, et al. (2014) hicieron uso de un controlador, para un sistema de control de velocidad tipo crucero en un vehículo, donde su vehículo fue una bicicleta eléctrica con motor de corriente continua. Con este lograron: reducir el sobrepico de 17,2% a 5%, mejorar el tiempo de estabilización a menos del 20% y eliminar el error de estado estacionario a menos de 0,01.

Por otra parte, en el artículo de Vanegas (2014) se destaca la nueva generación de controladores surgida de los sistemas ANFIS que combina las habilidades de inferencia de los sistemas difusos con la capacidad de aprender de las redes neuronales, y responde a la demanda de controladores difusos que sean flexibles y capaces de adaptarse a cambios producidos en su entorno de operación, bien por necesidades de ajuste debidos a imprecisiones, o situaciones no contempladas durante su fase de diseño, bien por su aplicación en entornos cambiantes y con cierto grado de incertidumbre.

Capítulo III. Marco Metodológico

Este capítulo del trabajo describe y desarrolla el tipo de investigación; las variables independientes y dependientes comprendidas en la investigación; la hipótesis planteada y las fases de desarrollo con el que se realizó el presente trabajo de investigación para el desarrollo del controlador robusto.

3.1 Tipo de investigación

El presente trabajo tiene un diseño de tipo experimental ya que para el desarrollo del controlador se requiere manipular las distintas variables que definen su comportamiento para buscar que el comportamiento sea el deseado.

A su vez, cuenta con un carácter explicativo. Debido a que para el diseño del controlador se requiere de un modelo matemático que defina el comportamiento del sistema; donde dependiendo de la señal de referencia (causa), el sistema actuará de una forma específica para obtener la salida deseada (efecto).

Por otro lado, cuenta con una naturaleza cuantitativa. El proceso de diseño requiere de seguir una serie de pasos específicos en un orden particular, ya que los resultados de una etapa son requeridos para desarrollar la siguiente.

Finalmente, el tipo de estudio según su finalidad es aplicado, ya que se busca implementar la teoría de control robusto en un escenario en particular; un sistema que permita la levitación magnética de una esfera en este caso.

3.2 Variables de investigación

Variables externas e internas que serán consideradas en el proyecto. Aún por definir

3.3 Hipótesis

El controlador diseñado una vez definidos todos sus componentes debería ser capaz de controlar la posición de la esférica metálica levitando dentro del campo magnético para que se encuentre en la posición deseada por el operador con un margen de error mínimo; a la vez de que se mantiene un comportamiento estable.

Se debería cumplir todo lo antes mencionado para distintos puntos de operación comprendidos en un intervalo definido y que dependen de las variables tanto internas como externas que rigen el comportamiento del sistema en cuestión; como pueden ser la temperatura, el valor de las resistencias o la gravedad.

3.4 Fases de desarrollo

3.4.1 Fase 1: Revisión bibliográfica

Se llevará a cabo un estudio matemático de todas las herramientas necesarias para el desarrollo de este trabajo que no forman parte de los contenidos de la carrera, como son los politopos y las *desigualdades matriciales lineales*; se realizará mediante la investigación en fuentes diversas que permitan adquirir estos conocimientos.

También se realizará la investigación, en distintos artículos de fuentes confiables, de distintos estudios relacionados al control robusto y sus distintas aplicaciones.

3.4.2 Fase 2: Modelación matemática del sistema dinámico

Tomando como base el modelo matemático de levitación magnética propuesto por Tao C. y Taur J. (1995); se modelará, mediante variables de estado, las distintas ecuaciones dinámicas no lineales que rigen el comportamiento de la planta estudiada. Posteriormente se calcularán los

distintos puntos de operación que presente el sistema y se procederá a linealizar el modelo matemático en un punto elegido.

3.4.3 Fase 3: Diseño del controlador nominal

Por medio del modelo antes desarrollado, se procederá a realizar un análisis en lazo abierto del sistema de levitación magnética haciendo hincapié en la estabilidad. A su vez, se definirán cuáles son las distintas variables inciertas y se calcularán sus intervalos de estabilidad.

Se procederá finalmente a desarrollar un controlador para el sistema, utilizando las distintas teorías de control antes estudiadas y el enfoque en variables de estado; empleando el modelo nominal, es decir, sin tomar en cuenta las variables inciertas.

3.4.4 Fase 4: Implementación de soporte para variables inciertas

Se buscará resolver el problema de seguimiento asintótico robusto de señales polinómicas para el sistema de flotación magnética de la esfera imponiendo como requisito de desempeño, la localización de los polos a lazo cerrado del sistema en una región predefinida del plano complejo que garantice unas condiciones de amortiguación y velocidad adecuadas.

3.4.5 Fase 5: Simulación para comprobar el funcionamiento del diseño

Se validará el funcionamiento del controlador antes diseñado mediante simulaciones en los softwares de Matlab y Simulink; se hará énfasis en la estabilidad del sistema y en su desempeño ante las distintas variaciones en sus parámetros internos. De no obtener resultados satisfactorios en este punto, se procederá nuevamente a la fase 4 y se modificará el diseño para mejorar su rendimiento.

Una vez comprobado en la simulación el correcto funcionamiento de este controlador, se dará por concluido este trabajo. No se realizará ningún prototipo físico del diseño.

Capítulo IV. Resultado y Discusión

Esta sección estará destinada a todo el capítulo de resultados con su correspondiente discusión.

Conclusiones

Esta sección estará destinada a las conclusiones

Recomendaciones

Esta sección estará destinada a las recomendaciones

Bibliografía

- Cavalcanti A. (2003). "Assembly automation with evolutionary nanorobots and sensorbased control applied to nanomedicine," in IEEE Transactions on Nanotechnology, vol. 2, no. 2, pp. 82-87, doi: 10.1109/TNANO.2003.812590.
- Daqui L, Sotomayor V., Surez J., Martín C. (2014). identificación y diseño del controlador para un sistema de control de velocidad tipo crucero en un vehículo. Recuperado de: <http://www.dsplace.espol.edu.ec/handle/123456789/25275>
- Dorf R., Bishop R. (2017). Modern Control Systems. Pearson.
- Hayt W. (2012). Teoría electromagnética. McGraw Hill
- Hurtado L, Villareal L. (2009). Control robusto de un sistema mecánica simple mediante una herramienta gráfica. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/15852/36191>
- Markow M., Yang Y., Welch J., Rylander H. and Weinberg W. (Dec. 1989). "An automated laser system for eye surgery," in IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, vol. 8, no. 4, pp. 24-29. doi: 10.1109/51.45953.
- Martinez K. (2018). Conceptos Básicos: Sistemas de Control. Revista InTech México Automatización. Recuperado de: <https://www.isamex.org/intechmx/index.php/2018/12/24/conceptos-basicos-sistemas-de-control/>
- Ogata K. (2010). Ingeniería de control moderna. Pearson.
- Osorio H. (2007). Teoría electromagnética. Recuperado de: http://www.tese.edu.mx/documentos2004/5289_ZQFFNLL.pdf
- RAE. (2020). campo. Recuperado de: <https://dle.rae.es/campo#EacE4N6>

- Silva B. (1998). Análisis de operabilidad y control robusto de un reactor de polimerización. Recuperado de: <http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/009770/009770s.pdf>
- Tao C. and Taur J. (1995). "A robust fuzzy control of a nonlinear magnetic ball suspension system,". Proceedings IEEE Conference on Industrial Automation and Control Emerging Technology Applications, pp. 365-369. doi: 10.1109/IACET.1995.527589.
- Teppa, P. (2008). Control robusto de un sistema lineal de parámetros variantes (LPV): Un enfoque de las desigualdades matriciales lineales (LMI). Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 23(1), 5-17. Recuperado en 24 de octubre de 2021, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000100001&lng=es&tlng=es.
- Vanegas, J. O., & Ríos, M. A. (2014). Diseño de un Regulador de Velocidad para una Pequeña Central Hidroeléctrica Utilizando Técnicas de Control Inteligente. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Vanegas-5/publication/275155427_Disen%C3%B3_de_un_Regulador_de_Velocidad_para_una_Peque%C3%B1a_Central_Hidroel%C3%A9ctrica_Utilizando_T%C3%A9cnicas_de_Control_Inteligente/links/553446230cf27acb0def928a/Disen%C3%B3-de-un-Regulador-de-Velocidad-para-una-Peque%C3%B1a-Central-Hidroel%C3%A9ctrica-Utilizando-T%C3%A9cnicas-de-Control-Inteligente.pdf
- Vivas C. (2004). Control óptimo y robusto H de sistemas no lineales, aplicaciones a sistemas electromecánicos. Recuperado de: <https://idus.us.es/handle/11441/15250>

Apéndices

Red de vínculos temáticos

Se elaboró un diagrama para explicar la red de vínculos temáticos desarrollados en el capítulo II.

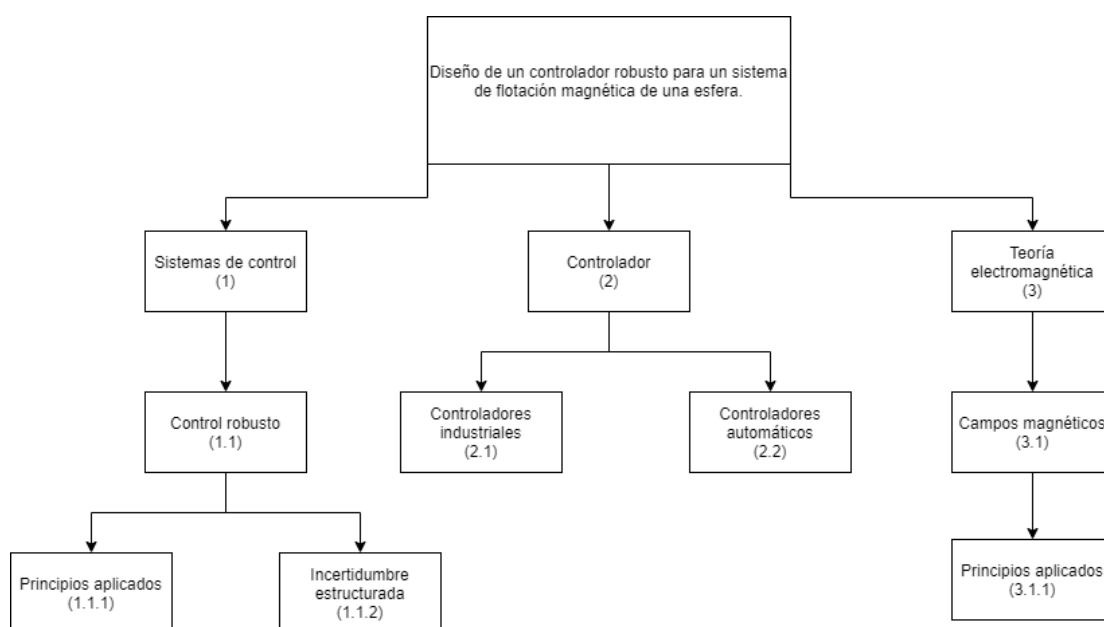


Figura 3

Diagrama de la red de vínculos temáticos

Fuente: Elaboración Propia