



*Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática*

Trabajo de Diploma

Tesis en Opción al título de Ingeniero en Automática.

Tema: Diseño de un controlador para un electroimán.

Autor: JoséFélixDíaz Charlot.

*Tutores: MSc. Osbeida LópezAlmarales.
MSc. Henry Bory Prevez.*

*Curso2015-2016
"Año 58 de la Revolución."*

PENSAMIENTO



“No hay más que asomarse a las puertas de la tecnología y la ciencia contemporánea, para preguntarnos si es posible vivir y conocer ese mundo del futuro sin un enorme caudal de conocimientos y preparación ”

Fidel Castro Ruz.

AGRADECIMIENTO

- ✿ **A mis padres**, por darme la vida, ayuda y apoyo para esta carrera de resistencia, porque siempre me han exigido que en la vida dar lo mejor de mí, sin reparar en sacrificios los deberes asumidos, para poder dedicarme a este trabajo. Con anhelo disfruten mis éxitos, GRACIAS POR ESTAR PRESENTE.
- ✿ **A mis hijos Thiago e Ibetxi** por esa alegría, esa fuerza que aportan a mi vida y ser la razón para superarme día tras día, dándome todo su cariño, amor y felicidad. Espero que mi esfuerzo les sirva de ejemplo y aprendan que se puede crecer en sabiduría, solo es proponérselo y emprender el camino lo elegimos nosotros mismos.
- ✿ A mi esposa, **Yaumara Leyva Fernández**, por estar a mi lado en todo momento, sugiriendo ideas para cada detalle de este trabajo; por su comprensión y apoyo quenunca me faltaron, eternas gracias.
- ✿ A mis hermanos **José Nery y Yanniel**, por seguir mi ejemplo cada día en la escuela.
- ✿ A toda mi familia, que son la razón por la que quiero ser aún mejor persona, para merecerlos.

Agradezco a todos los que forma directa o indirectamente apoyaron en este trabajo. A mis compañeros de aula, porque siempre he podido contar con ellos.

- ✿ A mis tutores **MSc. Osbeida López Almarales** y **MSc. Henry Bory Prevez**, quien siempre ha estado orientando y exigiendo un buen resultado, por su apoyo incondicional y por todo el tiempo dedicado.

DEDICATORIA

Este momento tan importante de mi vida, mi trabajo y mi esfuerzo se los dedico a ustedes que me dieron la vida, la felicidad y la sabiduría.

- 🌀 A mispadres Idania y Nery José.
- 🌀 A mis hijos José Thiago e Ibetxi.
- 🌀 A mis hermanos José Nery y Yannel.
- 🌀 A mi esposa Yaumara Leyva Fernández.

RESUMEN

El trabajo consiste en el diseño de un controlador para el electroimán Bruker BE-38, el cual pertenece al sistema de medición de campos magnéticos de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba, con el objetivo de realizar el diseño del controlador con fines de control. Se analizan los principales aspectos teóricos relacionados con los electroimanes y controladores Proporcional Integral (**PI**). Para este se utilizó el diseño polinomial el cual está fundamentado en el Teorema de Sylvester, aplicable para cualquier planta que se le quiera diseñar un controlador. Esto permite estudiar el sistema desde la óptica de la asignación de polos aplicado a los controladores **PI** y posteriormente diseñar estrategias de control, para estimar variables derivadas de los campos magnéticos. Finalmente se realiza el diseño del controlador y la simulación utilizando el software MATLAB V12.0, para obtener la respuesta del sistema.

El diseño del controlador para el electroimán Bruker BE-38, ofrece grandes aplicaciones para sistemas magnéticos dependiendo de su fiabilidad y robustez.

ABSTRACT

The work consists in the design of a control for the electromagnet Bruker BE 38, which as it belongs to James's system of measurement of magnetic fields of Normalization's Office Territorial of Cuba, for the sake of selling off the design of the control with ends of control. They examine the principal theoretic aspects once electromagnets were related to and Proportional Integral controls (**PI**). For this the polynomial utilized the design itself which be base in the Theorem of Sylvester, stop plant that they be about to design a controller. This permits to go into the system from the way of looking at things of assignment of poles applied for controls (**PI**) and later designing strategies of control, for estimating variables derived of magnetic fields. Finally, MATLAB V12.0, to obtain the answer of system accomplishes the control's design and the simulation utilizing the software himself.

The design of the control for the electromagnet Bruker BE-38, offer big applications for magnetic systems depending on his reliability and robustness.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTO TEÓRICO. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS MAGNÉTICOS Y CONTROLADORES PROPORCIONAL INTEGRAL (PI). DISEÑO POLINOMIAL Y MÉTODO DE ASIGNACIÓN DE POLOS.	
INTRODUCCIÓN	6
1.1. Fundamentos de los sistemas magnéticos	6
1.1.1. Materiales ferromagnéticos	7
1.1.2. Antecedentes de los electroimanes	11
1.2. Caracterización de los sistemas magnéticos	12
1.2.1. Aplicaciones de los electroimanes	16
1.3. Sistema magnético de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba (OTNSC)	18
1.4. Características de los controladores Proporcional Integral (PI)	19
1.4.1. Características del diseño polinomial y el método asignación de polo	19
1.4.2. Teorema de Sylvester	21
1.4.3. Cómo forzar un integrador en el lazo	22
1.5. Método de Asignación de Polos para controladores Proporcional integral (PI). Ajuste de parámetros	23
CONCLUSIONES CAPÍTULO	25
CAPÍTULO 2: DISEÑO DE UN CONTROLADOR POLINOMIAL PARA EL ELECTROIMÁN BRUKER BE-38	
INTRODUCCIÓN	26
2.1. Caracterización general del sistema magnético	26
2.2. Diseño polinomial del controlador	30
2.3. Simulación en el MATLAB	40
2.3.1. Robustez del controlador	42
CONCLUSIONES CAPÍTULO	44
CONCLUSIONES GENERALES	45
RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍAS	47
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

Los sistemas magnéticos constituyen un ejemplo de procesos que pueden ser tan complejos, como requiera un área de aplicación determinada. Múltiples aplicaciones de los sistemas magnéticos se han podido obtener, mediante los electroimanes como generadores y eslabón fundamental, ya que se han convertido en un elemento indispensable en la tecnología industrial y científica moderna.

Un electroimán es un tipo de imán cuyo campo magnético es producido por el paso de una corriente eléctrica en un sistema de bobinas provistas de un núcleo de hierro, la acción atractiva del electroimán cesa en cuanto se interrumpe la corriente. Los electroimanes se aplican en diferentes esferas, destacándose en el sector industrial, la agricultura, la medicina, la metrología, entre otros.

Una de las primeras aplicaciones del magnetismo se basó en el surgimiento de la brújula, la cual ejerció gran influencia sobre la navegación y los descubrimientos geográficos. Los electroimanes tienen numerosas aplicaciones en la técnica de la electricidad (timbres eléctricos, relé, motores, entre otros), en muchas ocasiones se construyen para que produzcan una determinada fuerza de tracción.

Como resultado del empleo creciente del magnetismo en el país, surge la necesidad de crear un laboratorio de mediciones magnéticas, el cual establecerá la referencia de la magnitud Inducción Magnética, al Sistema Internacional de Unidades (SI); donde la Oficina Territorial de Normalización (OTNSCU) y la Universidad de Oriente (UO) representada por el Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), han establecido un vínculo de intercambio de trabajo, con el objetivo de obtener un sistema para dicha nomenclatura. La tarea fundamental es proponer un laboratorio para realizar Experimentos, Ensayos de Espectroscopía y Mediciones Magnéticas en el país.

El laboratorio de mediciones magnéticas, posee una instalación para espectroscopía, donde el módulo principal de este sistema es un electroimán capaz de generar un campo magnético de .

1.5 T, con una fuente de corriente directa, comercializados por la firma alemana Bruker para el cual se prevé, dentro de sus funciones, que pueda ser utilizado en experimentos de diferentes propiedades físico-químicas de sustancias a través del método de la espectroscopía y de los

tiempos de relajación, métodos que requieren de campos magnéticos superiores a 10^{-9} T, y que actualmente no se realizan en el país por no existir sistemas magnéticos capaces de alcanzar dentro de sus parámetros, la estabilidad requerida en su funcionamiento.

Todos los análisis de espectroscopía que se llevan a cabo en el proceso de normalización en Cuba se realizan en el extranjero a un costo elevado, por ejemplo, en el análisis de productos lácteos (leche en polvo), el país tiene que hacer un gasto aproximadamente de 100000 dólares anualmente solamente por concepto de leche en polvo, sin mencionar el resto de los productos de esa industria, ni el resto de las industrias del país que requieran realizar análisis a sus productos para garantizar la calidad de los mismos y poder competir en el mercado internacional.

El control automático ha jugado un papel vital en el avance de la teoría en la ingeniería y en la práctica de la ciencia, brindando los medios para lograr el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos, mejorar la calidad y abaratar los costos de producción, liberar de la complejidad de muchas rutinas de tareas manuales; por lo que los ingenieros tienen contacto con los sistemas de control y estudian la teoría relacionada. El motivo principal del uso de un sistema de control es mantener cierta variable o variables de algún tipo, en un valor, o rango de valores previamente definidos [27].

Existe una gran variedad de aplicaciones de sistemas de control en plantas de procesos que utilizan múltiples tipos de controladores, tales como las industrias petroleras, químicas, farmacéuticas, de alimentos y bebidas, red de energía, minería, electroimanes, y otras aplicaciones. Los controladores también pueden clasificarse, de acuerdo con el tipo de energía que utilizan en su operación, como neumáticos, hidráulicos o electrónicos. El tipo de controlador que se use debe decidirse con base a la naturaleza de la planta y las condiciones operacionales, incluyendo consideraciones tales como seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, precisión, peso y tamaño.

Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reducirá la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina **acción de control**[14].

El electroimán Bruker BE-38 de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba, genera un campo magnético que es aplicado a partir de los experimentos y mediciones que se

planifiquen en dicha instalación, donde se trabaja con un electroimán que tiene una fuente asociada, a la cual se le realiza el ajuste manual de sus parámetros para la estimación de la magnitud Inducción Magnética, trayendo como consecuencia que se requieran de tiempos grandes para la toma de datos durante los distintos experimentos y ensayos que se realizan, además para lograr una respuesta rápida, fiable, con exactitud, es necesario generar un rango de trabajo para un punto de operación específico, lo cual resulta difícil a lazo abierto. Por lo que es necesario el diseño de una estrategia de control para este sistema, pero a lazo cerrado para mantener la estabilidad requerida en su funcionamiento, y con el uso de la simulación se puedan hacer predicciones sin necesidad de recurrir al proceso real. En base a lo antes expuesto, es necesario mejorar las prestaciones y aprovechamiento de la tecnología existente, lo planteado justifica la necesidad de resolver el siguiente problema:

Problema de la Investigación:

La necesidad de controlar el campo magnético del electroimán Bruker BE-38, perteneciente al laboratorio de Mediciones Magnéticas de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba.

Objeto de la Investigación: Los controladores para sistemas magnéticos.

Objetivo de la Investigación: Diseñar el controlador para el campo magnético del electroimán Bruker BE-38, perteneciente al laboratorio de Mediciones Magnéticas de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba.

Campo de Acción de la Investigación: El diseño de controladores polinomiales utilizando el software MATLABV12.0.

Hipótesis de la Investigación: Si se diseña el controlador para el campo magnético del electroimán Bruker BE-38, se garantizaría la estabilidad y precisión, además de realizar estimaciones de la variable a controlar, que permitirían perfeccionar la tecnología empleada aprovechando las potencialidades del electroimán, con el propósito de realizar mediciones de campo magnético, en el laboratorio de Mediciones Magnéticas de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba.

Tareas y Etapas de la Investigación:

1. Caracterizar gnoseológicamente, históricamente y en la actualidad, los electroimanes.
2. Caracterizar los controladores Proporcional Integral (PI), el diseño polinomial y el método de asignación de polo.
3. Caracterizar el electroimán Bruker BE-38.
4. Diseñar controladores polinomiales y evaluar su desempeño mediante la simulación.
5. Evaluar robustez del sistema a lazo cerrado.

Técnicas y métodos empleados en la investigación:

1. Técnicas empíricas y estadísticas.
2. Análisis de documentos.
3. Observación.
4. Método histórico lógico.
5. Métodos de análisis-síntesis.
6. Métodos experimentales.

Significación Práctica de la investigación:

La principal significación que se tendrá si se logra el diseño del controlador para el electroimán, se cumpliría con el objetivo de realizar los ensayos y análisis por el método de la espectroscopía que tanto se necesitan en el país; y se mejoraría, desde el punto de vista de la metrología, la precisión y exactitud de la medición de sistemas generadores y medidores de campos magnéticos que se utilizan actualmente. Con esta investigación, se realiza un aporte al establecimiento del Patrón Nacional de Inducción Magnética de la República de Cuba.

Aporte de la investigación:

El desarrollo de esta investigación, utiliza el electroimán Bruker BE-38 con los mejores puntos de operación y su comportamiento en la zona lineal, donde se profundiza en los conocimientos acerca del proceso y se proporciona una buena predicción de la variable en diferentes situaciones. Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se puede proponer un controlador que servirá para

posteriores diseños y estrategias de control e investigaciones que puedan derivarse alrededor de la temática del control, aumentando la eficiencia del proceso; y con el uso de la simulación se pueden hacer predicciones sin necesidad poner en riesgo el equipo. Se puede diseñar una estrategia de control que permita aumentar las prestaciones del equipo, paralos ensayos de espectroscopía, lo cual resuelve la problemática que presenta el país de no realizar estos ensayos, por no poseer tecnologías (como la que se estudia) capaces de alcanzar dentro de sus parámetros, la estabilidad requerida en su funcionamiento. Los ensayos se podrían realizar fundamentalmente a industrias susceptibles como la alimenticia y la farmacéutica, ya que el país presenta la problemática de no realizar estos tipos de ensayos, por no poseer un sistema a lazo cerrado capaz de mantener la estabilidad requerida en su funcionamiento.

El informe para una mejor comprensión de lo que se está investigando, está estructurado en resumen, introducción, dos capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

En el primer capítulo se caracteriza el objeto y el campo de la investigación. Se estudian, los antecedentes delos campos magnéticos, los electroimanes con sus aplicaciones, además el fundamento teórico de los sistemas magnéticos, particularizando en el electroimán Bruker BE-38. Se muestran las características de los controladores Proporcional Integral (PI), así como la explicación del diseño polinomial (Teorema de Sylvester) y el método de asignación de polos.

En el segundo capítulo se caracteriza el electroimán Bruker BE-38 y su fuente asociada, que permite conocer el funcionamiento a partir de todos los datos técnicos y físicos. Después se realiza el diseño polinomial del controlador a través del Teorema de Sylvester para hallar la función de transferencia del controlador. Por último se evalúa la robustez y se calculan los parámetros de ajuste del controlador por el método de la asignación de polos.



''No hay más que asomarse a las puertas de la tecnología y la ciencia contemporánea, para preguntarnos si es posible vivir y conocer ese mundo del futuro sin un enorme caudal de conocimientos y preparación ''

Fidel Castro Ruz.

Capítulo 1

Capítulo 1. Fundamento teórico. Características de los sistemas magnéticos y controladores Proporcional Integral (PI). Diseño polinomial y método de asignación de polos.

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se abordan los antecedentes, principios físicos, aplicaciones y fundamentos relacionados con los sistemas magnéticos, destacando a los electroimanes como componente indispensable de estos sistemas. Se realiza una representación en bloques del Sistema Magnético de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba. Se caracterizan los controladores Proporcional Integral (PI), así como la explicación del diseño polinomial (Teorema de Sylvester) y el método de asignación de polos.

1.1. Fundamentos de los sistemas magnéticos

En el universo existen diferentes campos de fuerza que interactúan entre ellos y sobre las demás estructuras físicas. Estos campos, algunos creados por la naturaleza, han provocado que innumerables investigadores elaboren teorías que ayuden a explicar el origen de estos, cómo se relacionan con el mundo para utilizarlos en la vida práctica. Entre estos campos de fuerza se encuentra la fuerza magnética.

El campo magnético es la región del espacio donde se ponen de manifiesto los fenómenos magnéticos. Se dice que en un punto de una región del espacio existe un campo magnético **B**, si al situar en dicho punto una carga **q** que se mueve con velocidad **V**, aparece sobre ella una fuerza que viene dada por la expresión:

$$F = qV \times B \quad (1.1)$$

La fuerza **F** con que se atraen o repelen dos masas magnéticas puntuales **m** y **m'**, separadas por una distancia **d** se obtiene por la fórmula de Coulomb siguiente:

$$F = k \frac{mm'}{d^2} \quad (1.2)$$

En la cual, k es un coeficiente que depende de la naturaleza del medio que separa ambas masas, $k = 1$ en el vacío.

En la práctica y en investigaciones científicas, los materiales ferromagnéticos son los que han obtenido la más amplia utilización. Los materiales ferromagnéticos compuestos generalmente por hierro, aleaciones de níquel, cobalto, tungsteno, y otros metales, son los materiales magnéticos más comunes [11, 15].

1.1.1. Materiales ferromagnéticos

Los materiales ferromagnéticos, son aquellos cuya permeabilidad magnética alcanza grandes valores y depende del campo magnético exterior, los mismos poseen una magnetización residual en ausencia del campo magnético exterior [6, 13].

En los materiales ferromagnéticos, los momentos magnéticos individuales de grandes grupos de átomos o moléculas, se mantienen alineados entre sí, debido a un fuerte acoplamiento, aún en ausencia de campo exterior, cualquier material ferromagnético está formado por pequeñas regiones tridimensionales en las cuales los momentos magnéticos están todos alineados en la misma dirección, estas regiones se denominan dominios, normalmente los dominios son de tamaño microscópico. La magnetización se define para cada elemento de volumen que representa un punto en el sólido, como:

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{V} \quad (1.3)$$

$\vec{\mu}_i$: Representa el momento magnético.

V: El volumen del sólido.

Si se coloca una barra de hierro desimada dentro de un solenoide, se obtiene un campo magnético resultante mayor, por lo que el aumento del campo magnético se debe a la suma del campo generado por las corrientes libres y del campo creado por las corrientes de magnetización. El nuevo campo magnético resultante se denomina inducción magnética, densidad del flujo o

simplemente inducción y se denota por **B**. La inducción magnética **B** es la suma del campo aplicado $\mu_0 \mathbf{H}$ y el campo externo proveniente de la magnetización de la barra dentro del solenoide:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.4)$$

Donde la permeabilidad magnética del espacio libre es $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ mT/A}$.

Cuando se coloca un material dentro de un campo magnético, aumenta la intensidad del campo magnético, este incremento en la imanación se mide mediante una cantidad llamada, permeabilidad magnética μ , definida como:

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} \quad (1.5)$$

Los materiales magnéticos que son fácilmente magnetizados tienen alta permeabilidad magnética, cuando el campo aplicado es muy intenso, el valor de la magnetización **M** tiende al valor de saturación, y el material se satura, no hay posibilidad de que **M** crezca aunque **H** se incremente, pues todos los dominios están orientados paralelos al campo [6, 13].

Atendiendo a algunas de sus propiedades los materiales ferromagnéticos se clasifican en:

1. Materiales magnéticamente blandos.
2. Materiales Magnéticamente duros.

1. Materiales magnéticamente blandos.

Los materiales magnéticamente blandos son fácilmente imanables y desimanables, también presentan curvas de histéresis de apariencia estrecha con bajos campos coercitivos y alta saturación, teniendo altas permeabilidades magnéticas. Este hecho se debe a la presencia de pocas imperfecciones y defectos que constituyen obstáculos al movimiento de paredes de los dominios magnéticos o al giro de la imanación dentro de un dominio, Figura 1.1 [9].

Un valor típico de la fuerza coercitiva en estos materiales es de 10 A/m, el sentido de la magnetización se invierte fácilmente al aplicar campos de muy pequeña intensidad. El campo de saturación o de magnetización está determinado solamente por la composición del material, ejemplo de ello son las ferritas.

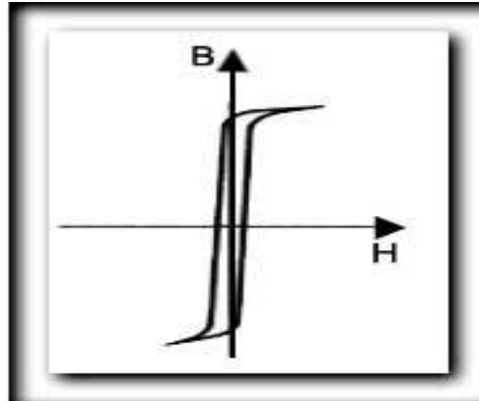


Figura 1.1 Ciclo de histéresis de un material magnéticamente blando.

Un valor bajo de coercitividad corresponde al movimiento fácil de las paredes de dominios en respuesta a los cambios de dirección del campo. Los defectos estructurales tales como la presencia de partículas de una fase no magnética o bien de poros en el material magnético, tienden a restringir el movimiento de las paredes de dominios y por tanto a aumentar la coercitividad, por consiguiente un material magnético blando debe de estar libre de defectos estructurales [6].

En el proceso de imanación-desimanación del material magnético tienen lugar pérdidas energéticas básicamente debidas a dos fenómenos:

- 🔵 **Las pérdidas por histéresis:** se deben a la disipación de energía requerida para desplazar las paredes de los dominios magnéticos durante la imanación y desimanación del material. Estas pérdidas aumentan por la presencia de impurezas, imperfecciones, dislocaciones, entre otros, que actúan como barreras que impiden el desplazamiento de las paredes de dominios durante el ciclo de imanación, incrementando las pérdidas de energía de histéresis. El área encerrada por la curva de histéresis es una medida de la energía perdida debida a la histéresis magnética [10].

- ❏ **Las pérdidas por corrientes parásitas:** se deben a corrientes inducidas por variaciones en el flujo magnético, y se pueden reducir aumentando la resistividad del material. Esto se obtiene, por ejemplo, añadiendo impurezas sustitucionales, utilizando una estructura laminar o de hojas y aplicando una capa aislante entre una hoja y la siguiente [10].

2. Materiales magnéticamente duros.

Se caracterizan por una alta fuerza coercitiva **H_c** y una alta inducción magnética remanente **B_r**; de este modo, los ciclos de histéresis de estos materiales son anchos y altos, como se muestra en la Figura 1.2.

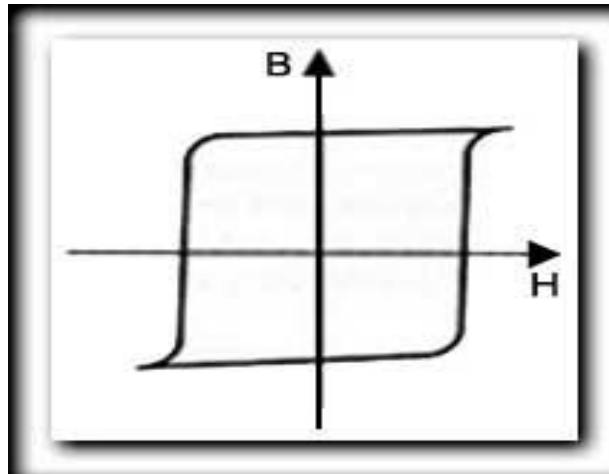


Figura 1.2 Ciclo de histéresis de un material magnéticamente duro.

Estos materiales se iman en un campo magnético lo suficientemente fuerte como para orientar sus dominios magnéticos en la dirección del campo aplicado. Una parte de la energía aplicada del campo se convierte en energía potencial que se almacena en el imán permanente producido. Un imán permanente, se encuentra en un estado de energía relativamente alto, comparado con un imán que no está imanado. Los materiales magnéticos duros son difíciles de desimantar, una vez imanados debido básicamente a sus altas constantes de anisotropía cristalina y a defectos que imposibilitan el movimiento de las paredes de dominio[6].

Los materiales duros se utilizan en la confección de imanes permanentes, ya que es necesario aplicar un campo magnético muy intenso en sentido contrario al de magnetización para que la inducción se reduzca a cero, los valores de **H_c** pueden ser del orden de $5 \cdot 10^4$ A/m, y aún mayores.

1.1.2. Antecedentes de los electroimanes

El primer electroimán que se exhibió en el mundo por William Sturgeon, fue el 23 de mayo de 1825 en la Sociedad Británica de Oficios, era una barra recubierta de hierro de 30 cm de largo y 1.3 cm de diámetro, doblada en forma de herradura y cubierta de una capa de alambre de cobre no aislado. Un electroimán es un imán cuyo campo magnético es producido por el paso de corriente eléctrica por un sistema de bobinas provistas de un núcleo de hierro. Se compone de un material ferromagnético denominado núcleo, alrededor del cual se ubica un cable conductor de forma espiral llamado solenoide. Su ventaja es proporcionar un campo magnético intenso y de larga duración, además al tener dominio de la corriente eléctrica aplicada, es posible adaptar el campo producido de acuerdo a las necesidades de los experimentos especificados en un punto[23, 24, 30].

En las mediciones de campos magnéticos se utiliza como unidad de medida el tesla, esta unidad en el Sistema Internacional(**SI**) es nombrada así en honor a Nikola Tesla. En las unidades del SI cuyo nombre proviene del nombre propio de una persona, la primera letra del símbolo se escribe con mayúscula (**T**), en tanto que su nombre siempre empieza con una letra minúscula (**tesla**), salvo en el caso de que inicie una frase o un título.

Los **electroimanes Bitter** están contruidos de placas de metal circulares y espaciadores aislantes, apilados en una configuración helicoidal, en lugar de bobinas de alambre. La corriente fluye en una trayectoria helicoidal a través de las placas. Este diseño fue inventado en 1933 por el físico estadounidense Francis Bitter. El propósito del diseño de la placa es apilada, para resistir la enorme presión mecánica hacia el exterior producida por las fuerzas de Lorentz. Además, el agua circula a través de agujeros en las placas como un refrigerante, debido al calentamiento creado en las placas por las grandes corrientes que fluyen a través de las grandes bobinas[17].

A partir de estos antecedentes históricos se construyó uno de los electroimanes más grandes para un dispositivo atractivo de metales, por medio de un martillo de hierro (este martillo es la bola de hierro llamada de esta forma que tenían los electroimanes al ser colgados por grandes grúas). En este caso el electroimán tiene grandes ventajas, puesto que al poco tiempo se fabricaron

electroimanes más grandes, aún capaces de levantar desde 1.2 t hasta 50 t, creciendo así la potencia de los electroimanes.

Estos electroimanes se utilizan también en el transporte, así, para que las ruedas de las vagonetas se adhieran mejor a los rieles y aumente el roce, los ingenieros, todavía en 1910, montaban las ruedas por medio de electroimanes, utilizando este, se logró aumentar el coeficiente de rozamiento y, por consiguiente, triplicar el peso de la carga transportada. Experimentos análogos se realizaron en amplia escala en los ferrocarriles de la URSS en 1960[22].

Sobrevino la nueva era de incremento de la potencia de los imanes, pero no aumentando sus dimensiones, sino mediante el perfeccionamiento de su forma e interés de continuar en las investigaciones contra la saturación de los electroimanes. Para lograr cada vez aumentar corriente sin que la inducción del campo magnético disminuya notablemente, para ello se requiere de un respaldo electrónico, consumo energético y tecnológico que es costoso en la actualidad.

1.2. Caracterización de los sistemas magnéticos

Los parámetros que intervienen en la caracterización del sistema magnético permiten conocer la calidad del mismo, a continuación se enumeran los más importantes a tener en cuenta:

1. Histéresis magnética.

La histéresis es el fenómeno de inercia por el cual un material ofrece resistencia a un cambio, ya que tiene tendencia a conservar sus propiedades. Esta resistencia se manifiesta haciendo que el proceso de variación sea distinto en un sentido contrario. Las pérdidas por histéresis representan una pérdida de energía que se manifiesta en forma de calor en los núcleos magnéticos. El calor así generado reduce el rendimiento de los dispositivos con circuitos magnéticos, como transformadores, motores, generadores, entre otros [15].

Después de someter a una sustancia ferromagnética a la acción de un campo magnético, cuando este desaparece la sustancia manifiesta todavía un cierto nivel de inducción magnética, llamada magnetismo remanente.

En la Figura 1.3 se muestra la curva de magnetización, que es en sí la relación entre la intensidad de campo magnético y la densidad de flujo. La región lineal se encuentra entre 0 y B_s (densidad de flujo magnético de saturación). Más allá de B_s el material magnético comienza a saturarse (región de saturación), y la razón de incremento de permeabilidad puede ser mucho menor que la permeabilidad en la región lineal. Esta región de transición entre la región lineal y saturación se le conoce como "rodilla" de la curva.

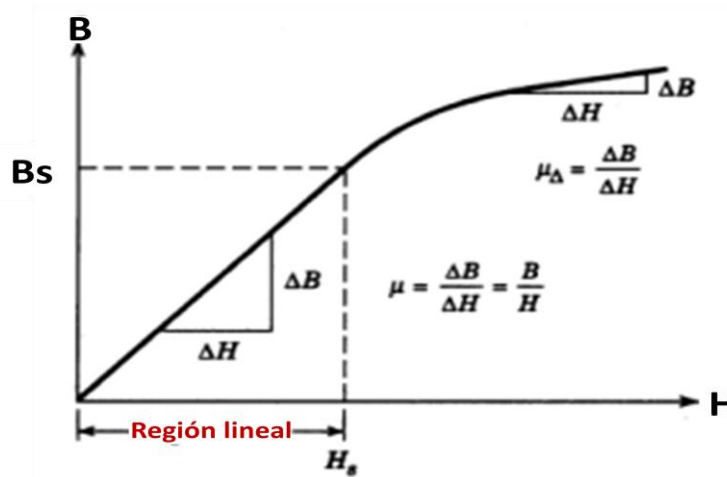


Figura 1.3 Región lineal de B frente a H .

La inducción magnética B y la intensidad del campo magnético H no son proporcionales en el caso de los materiales ferromagnéticos. Si el material está inicialmente no magnetizado, entonces B varía en función de H .

A partir de la saturación, a medida que el campo H se reduce debido a la inversión de su dirección, la curva no sigue el camino original, sino que se produce un efecto de histéresis en el cual el campo B va retrasado con respecto al campo aplicado H , Figura 1.4, o sea disminuye más lentamente. Cuando el campo H es cero, existe un campo residual B que se denomina remanencia o densidad de flujo remanente B_r , y es uno de los parámetros que caracteriza el electroimán, aquí el material permanece magnetizado en ausencia de un campo externo H . Esta inducción magnética es motivada por la imanación remanente que permanece en el material al eliminar el campo y asociada al movimiento irreversible de paredes al quedar éstas imperfecciones que impiden el retorno a su posición original.

Para reducir a cero el campo **B** dentro de la muestra se debe aplicar un campo **H** de magnitud igual a **-H_c** en sentido opuesto a la del campo original, **H_c** se denomina coercitividad, o bien, algunas veces, fuerza coercitiva.

Al continuar aplicando el campo en la dirección contraria, finalmente se alcanza la saturación en la dirección opuesta. Una segunda inversión del campo hasta el punto de la saturación inicial, completa el ciclo de histéresis simétrico y también produce una remanencia negativa (**-B_r**) y una coercitividad positiva (**H_c**).

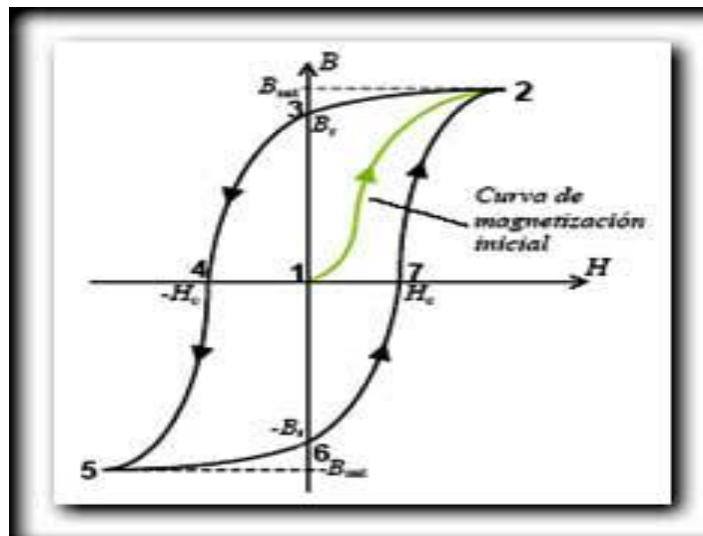


Figura 1.4 Ciclo de histéresis completo para un material ferromagnético.

El área dentro de la curva representa la energía magnética perdida por unidad de volumen de material por ciclo de magnetización y desmagnetización, esta energía se manifiesta como calor dentro del material y es capaz de elevar la temperatura del mismo.

El ciclo de histéresis magnético, está estrechamente ligado a la estructura de dominios presente en el material, parámetros tales como la imanación remanente o el campo coercitivo dependen, no solo del material, sino también de su microestructura, tamaño de grano y presencia de defectos, además de su relación con los dominios magnéticos [15].

2. Inhomogeneidad del campo.

Grado de distribución del valor obtenido del campo magnético medido en el entorno del volumen ocupado por el sensor. El cálculo de este parámetro permite estimar cuan inhomogéneo es el valor del campo en la región del espacio que se utiliza, y se define [15].

$$Ih_{campo} = \frac{\Delta \vec{B}}{\vec{B}} \quad (1.7)$$

Donde Ih_{campo} es la inhomogeneidad del campo, $\Delta \vec{B}$ es la variación del campo magnético y $\vec{B}$ el valor promedio, ambos dentro del volumen del sensor.

El campo magnético que se mide debe ser muy uniforme en cualquier punto del seno magnético, donde se tiene un campo y se coloca un sensor para hacer mediciones de campo por cualquiera de los métodos de Efecto Hall y Resonancia Magnética Nuclear de Pulsos[15].

3. Campo magnético remanente.

Se debe partir de que el electroimán tiene 0 V en la fuente y 0 T de campo magnético, cuando el electroimán se le va suministrando corriente hasta llegar al valor máximo de campo que se está trabajando, para trabajar en un punto de operación fijo hasta 1.5 T, y luego se disminuye a 0 V en la fuente y el campo magnético, siempre queda imantado, es decir que dependiendo del material queda siempre una determinada remanencia.

Los polos del electroimán poseen un campo magnético remanente (que persiste o perdura). La remanencia es una propiedad de los cuerpos ferromagnéticos, los cuales conservan cierta imantación una vez que se suprime el campo magnetizante. Para imanes de alta calidad es muy pequeño, a propósito señalando que la calidad depende del tipo de material del núcleo, de la histéresis, la permeabilidad y la inductancia para cada material y punto de operación, no obstante, también existe una técnica para eliminar el campo magnético residual que subsista. ¿Cómo se elimina la remanencia?, consiste en invertir la polaridad de la fuente y aumentar hasta el máximo el valor del campo y luego reducirlo hasta el mínimo, con la repetición (experimentalmente para el electroimán en estudio se ha hecho 2 veces) de este procedimiento se logra un gradual ajuste del retorno al cero[15].

Para simplificar el análisis físico de las ecuaciones que se deben tener en cuenta, se hacen las siguientes consideraciones:

- El núcleo está conformado por un material magnético, cuya permeabilidad es mucho mayor que la del aire que lo rodea, por lo que ésta puede suponerse infinita lo que implica que no existe flujo de dispersión.
- El núcleo es homogéneo.

Se explica a continuación los aspectos físicos esenciales de los circuitos magnéticos, donde un sistema excitado mediante una bobina por la que circula una corriente **i**, produce un campo magnético asociado a esa corriente.

El bobinado produce un campo magnético en el núcleo. La relación entre la corriente y la intensidad del campo magnético, se establece mediante la ley de Ampere, esto es **[11]**.

$$F_m = \oint \vec{H} d\vec{l} = Ni \quad (1.6)$$

Donde **H** es la intensidad del campo magnético, **N** el número de vueltas de la espira, la corriente **i** que circula a través de la bobina en ampere. La fuente del campo magnético es el producto del número de vueltas por la corriente llamado fuerza magnetomotriz(**F_m**) dado en ampere-vuelta.

1.2.1. Aplicaciones de los electroimanes

Una de las primeras aplicaciones del magnetismo se basó en el surgimiento de la brújula, la cual ejerció gran influencia sobre la navegación y los descubrimientos geográficos. Los electroimanes tienen numerosas aplicaciones en la técnica de la electricidad (timbres eléctricos, relé, motores), en muchas ocasiones se construyen para que produzcan una determinada fuerza de tracción. En el Anexo 1 se pueden observar imágenes que ilustran las aplicaciones que a continuación se mencionan.

- **Reciclaje industrial y tratamiento de residuos.** Se le conoce como sistemas de bandas (overbands), en la eliminación de partículas férricas del material que circula en las cintas transportadoras.

- ❖ **Depósitos de chatarra y en refinerías de desechos metálicos.** Se utilizan para mover grandes cantidades de metal desechable. Los grandes electroimanes están compuestos de una placa de hierro unida a una grúa para levantar toneladas de metal.
- ❖ **Tubos magnéticos y filtros magnéticos.** Sirven en la eliminación manual de los materiales férricos, el filtrado de las partículas férricas de productos líquidos, en circuitos hidráulicos y en sistemas de refrigeración.
- ❖ **Bandas magnéticas.** Se pueden encontrar bandas magnéticas en todas las tarjetas de crédito, boletos de estacionamiento. También se utilizan bandas magnéticas en sistemas de control de asistencia en las empresas y en muchas otras aplicaciones donde se requiere un buen grado de seguridad y rapidez en la captura de datos.
- ❖ **Levitación.** La levitación consiste en mantener un objeto suspendido en el aire sin ningún tipo de contacto mecánico. En el caso de la levitación magnética, la fuerza que permite esta suspensión es la fuerza electromagnética. Esta fuerza electromagnética es generada por un electroimán que mediante atracción permite mantener en suspensión un objeto ferromagnético. Una aplicación muy importante es en el transporte masivo de trenes, es rápido y económico [19].
- ❖ **Aplicaciones biológicas.** Se han utilizado electroimanes superconductores para generar campos magnéticos intensos y estudiar sus efectos en el crecimiento de plantas, y analizar el comportamiento en los animales. Se aplican los campos magnéticos al agua de riego y a las semillas produciendo cambios físicos que favorecen la nutrición y el crecimiento de las plantas.
- ❖ **Aplicaciones médicas.** El empleo de campos magnéticos está dirigido a desarrollar métodos y equipos para el tratamiento de enfermedades, ampliar e investigar las posibilidades de diagnóstico mediante los sistemas de Imagen de Resonancia Magnética (IRM) y también estudiar la influencia de los campos magnéticos en las funciones vitales del cuerpo humano.
- ❖ **Los motores eléctricos.** La bobina que recubre al núcleo, hace que éste gire sobre su eje. Sólo basta un arreglo adecuado de la bobina y el voltaje suficiente para darle mayor potencia al motor. Crear el campo magnético de las máquinas eléctricas, donde todas las máquinas eléctricas actuales se excitan mediante electroimanes que emplean bobinados de cobre. En estos aparatos, se aprovecha la alta permeabilidad magnética del hierro o de las aleaciones de hierro con que se fabrican sus circuitos magnéticos; tanto de motores como de generadores.

1.3. Sistema magnético de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba (OTNSC)

El electroimán Bruker modelo BE-38 (Anexo 2) de la OTNSC trabaja con corriente directa, posee dos bobinas de **N** vueltas donde se establece un campo constante, el cual está sujeto a un núcleo que tiene ciertas características ferromagnéticas, estableciendo líneas de flujo magnético que se cierran. Para ello tiene una estrecha relación con el resto de los bloques componentes como es el sistema de enfriamiento, así como los sistemas de mediciones parten de dos principios físicos diferentes, pueden ser utilizados en dependencia del experimento requerido, Figura 1.5. Este electroimán obtiene la magnitud física Inducción Magnética, utilizando sensores con el principio físico de la Resonancia Magnética Nuclear de Pulsos (RMNP) y el principio físico del Efecto Hall, para realizar las mediciones de campo magnético.

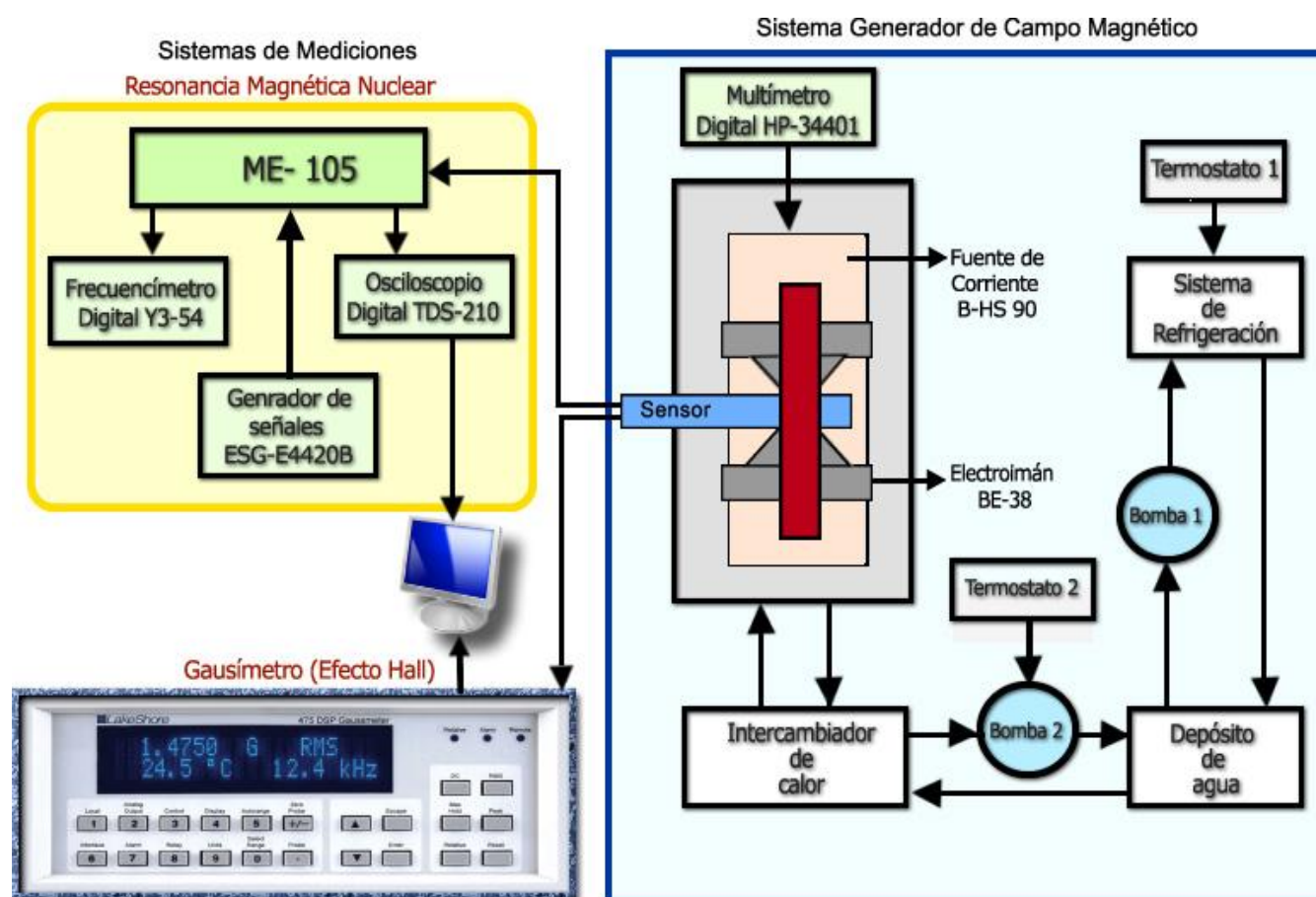


Figura 1.5 Esquema en bloques del Sistema Magnético.

1.4. Características de los controladores Proporcional Integral (PI)

El controlador Proporcional Integral(PI) se caracteriza por la función de transferencia:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1.8)$$

G_c : Función de transferencia del controlador.

K_p : Ganancia.

T_i : Tiempo de integración.

El controlador Proporcional Integral (PI) es un compensador de atraso. Tiene un cero en $s = -\frac{1}{T_i}$ y un polo en $s = 0$. Por tanto, la característica del controlador **PI** es de ganancia infinita a una frecuencia cero. Esto mejora las características en estado estable. Sin embargo, la inclusión de la acción de control Integral en el sistema incrementa en 1 el tipo del sistema compensado, y esto provoca que el sistema compensado sea menos estable o, incluso, que se vuelva inestable.

Por tanto, deben elegirse con cuidado los valores de **K_p y T_i** para asegurar una respuesta transitoria adecuada. Si el controlador **PI** se diseña adecuadamente, es posible hacer que la respuesta transitoria para una entrada escalón no exhiba ningún sobrepaso o presente un sobrepaso relativamente pequeño. Sin embargo, la velocidad de respuesta se hace mucho más lenta. Esto se debe a que el controlador **PI**, puesto que es un filtro paso-bajo, atenúa los componentes de frecuencia alta de la señal[15].

1.4.1. Características del diseño polinomial y el método de asignación de polo

El diseño polinomial es un método aplicable para cualquier planta que se le quiera diseñar un controlador, debido a que se aplica en el dominio temporal, es un método analítico y algebraico que trabaja con funciones de transferencia y no necesita llevar el sistema al límite de la estabilidad ya que se puede ajustar de forma algebraica, para justificar lo antes mencionado se considera la Figura 1.6 el lazo de control nominal del sistema.

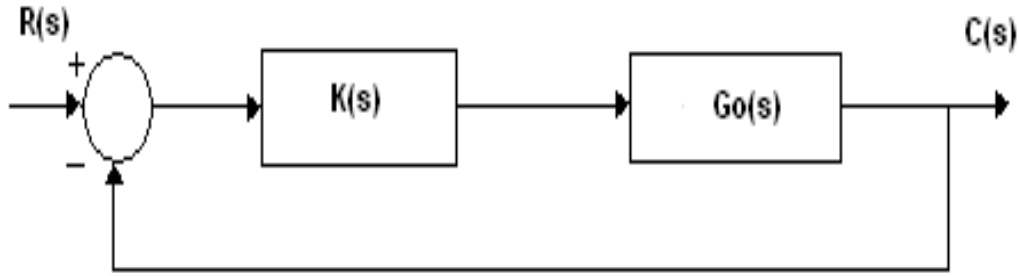


Figura 1.6Esquema en bloques del Sistema Magnético.

Donde las funciones de transferencia de la planta y el controlador están dadas por los cocientes de polinomios:

$$K(s) = \frac{P(s)}{L(s)} \quad (1.9)$$

$P(s)$: Polinomio

$L(s)$: Polinomio

$$G_0(s) = \frac{B_0(s)}{A_0(s)} \quad (1.10)$$

$A_0(s)$: Polinomio

$B_0(s)$: Polinomio

Definidas por sus polinomios:

$$P(s) = p_{n_p}s^{n_p} + p_{n_p-1}s^{n_p-1} + \dots + p_0 \quad (1.11)$$

$$L(s) = l_{n_l}s^{n_l} + l_{n_l-1}s^{n_l-1} + \dots + l_0 \quad (1.12)$$

$$B_0(s) = b_n s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_0 \quad (1.13)$$

$$A_0(s) = a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_0 \quad (1.14)$$

Suponer que se tiene un polinomio característico a lazo cerrado, dado por la siguiente ecuación 1.15:

$$A_{lc}(s) = C_{n_c}s^{n_c} + C_{n_c-1}s^{n_c-1} + \dots + C_0 \quad (1.15)$$

Que puede elegirse a partir de la respuesta deseada del sistema a lazo cerrado, cumpliendo, por ejemplo, con cierto valor de respuesta.

El objetivo es ver si, dados los polinomios B_0 y A_0 que definen la planta, se puede diseñar polinomios P y L de modo que el polinomio característico de lazo cerrado sea A_{lc} [17].

1.4.2. Teorema de Sylvester

El **Teorema de Sylvester** dice que este diseño es posible mientras los polinomios $A(s)$ y $B(s)$ sean coprimos.

Dados dos polinomios:

$$A(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0 \quad (1.16)$$

$$B(s) = b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_0 \quad (1.17)$$

La matriz determinante:

$$M_e(A, B) = \begin{bmatrix} a_n & 0 & - & 0 & b_n & 0 & - & 0 \\ a_{n-1} & a_n & - & 0 & b_{n-1} & b_n & - & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - \\ a_0 & a_1 & - & a_n & b_0 & b_1 & - & b_n \\ 0 & a_0 & - & a_{n-1} & b_1 & b_0 & - & b_{n-1} \\ - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & - & a_0 & 0 & 0 & - & b_0 \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Entonces $A(s)$ y $B(s)$ son coprimos si y solo si el determinante $\{M_e\} \neq 0$.

Recordando que dos polinomios son coprimos o relativamente primos, si no tiene factores comunes.

El **Teorema de Sylvester** muestra como la asignación de polos es posible para sistemas lineales estacionarios SISO en general. Resumimos las condiciones en el siguiente lema.

Lema (Asignación de Polos) sea el lazo de control SISO de un grado de libertad, con un controlador y modelo nominal de la planta. Suponer que $B_0(s)$ y $A_0(s)$ son polinomios coprimos, y sea $A_{lc}(s)$ un polinomio arbitrario de grado $n_c = 2n - 1$. Entonces existen polinomios $P(s)$ y $L(s)$ de grados $n_p = n_l = n - 1$, tales que:

$$A_0(s)L(s) + B_0(s)P(s) = A_{lc}(s) \quad (1.19)$$

$A_{lc}(s)$: Polinomio deseado a lazo cerrado.

Como se observa, la asignación de polos es posible siempre que la función de transferencia de la planta no tenga factores comunes entre numerador y denominador. Notar que el lema da una condición **suficiente**.

El lema para un Controlador Estrictamente Propio, tiene la condición para la que existe solución:

1. Los grados mínimos de $P(s)$ y $L(s)$ deben ser $n_p = n - 1$ y $n_l = n$ respectivamente.
2. Poder elegir arbitrariamente un polinomio a lazo cerrado deseado $A_{lc}(s)$, su grado debe ser $2n$ [21].

1.4.3. Cómo forzar un integrador en el lazo

Un requerimiento estándar en el diseño de sistemas de control es que, en régimen permanente, el lazo de control deba tener error nulo en el seguimiento de referencias constantes. Este error se suele llamar **error estático de posición** Figura 1.7.

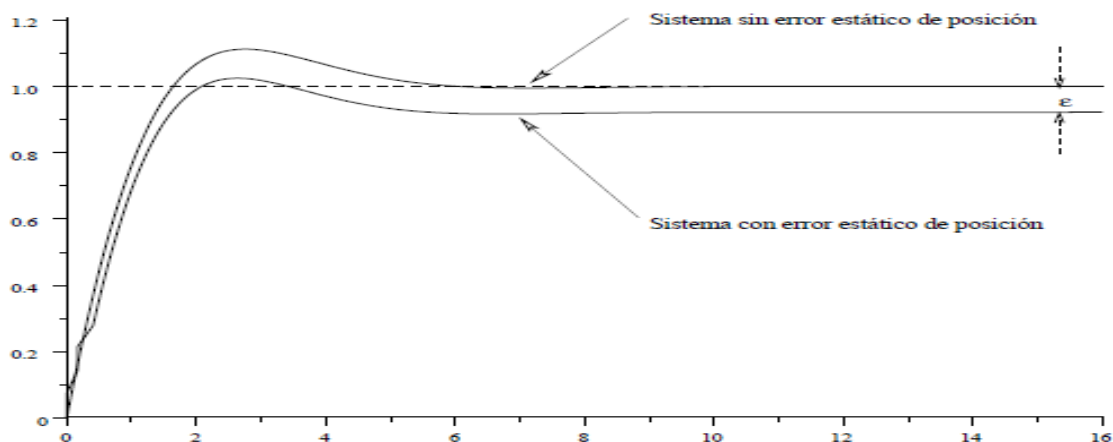


Figura 1.7 Respuesta del sistema forzando un integrador.

Para restringir la solución de problema de asignación de polos, para satisfacer ciertos requerimientos de diseños especiales se fuerza un integrador en el lazo para que permita alcanzar error estático de posición nulo en la respuesta a la referencia.

Una condición necesaria y suficiente para obtener error estático de posición nulo, $e(t) \rightarrow 0$ es que el lazo nominal sea internamente estable y el controlador tenga al menos un polo en el origen. Efectivamente, si el controlador tiene al menos un polo en el origen, entonces es de la forma:

$$K(s) = \frac{P(s)}{sL(s)} \quad (1.20)$$

s : Integrador.

Para forzar un integrador en el lazo mediante asignación de polos simplemente se elige:

$$L(s) = sL(s) \quad (1.21)$$

La ecuación de lazo cerrado puede reescribirse:

$$L(s)A_0(s) + P(s)B_0(s) - A_{lc}(s) \quad (1.22)$$

donde $A_0(s) = sA_0$

La solución del problema de asignación de polos puede ahora considerarse como un problema equivalente pero con un modelo de grado $n = n + 1$.

Con la modificación de A_0 , el lema visto requiere que A_{lc} se elija de grado mínimo $2n - 1 = 2n + 1$. Sin embargo, es posible simplificar en este caso a pedir que A_{lc} sea sólo de grado $2n$. Esto es posible porque P puede tener un grado mayor en 1 al de L , y aún se obtiene un controlador estrictamente propio [21].

1.5. Método de Asignación de Polos para controladores Proporcional Integral (PI). Ajuste de parámetros

El ajuste de parámetros o sintonía de controladores, es uno de los aspectos más importantes en el contexto de un sistema de control. A pesar de su importancia, existen tan solo algunos procedimientos generales que permiten la estimación de los parámetros en base a mediciones directas del proceso o por relaciones empíricas. Se hace hincapié que son solamente métodos aproximados y por lo tanto deben realizarse un ajuste fino de los parámetros, en un entorno, hasta lograr la respuesta adecuada.

El diseño por la Asignación de Polos coloca todos los polos de lazo cerrado en las posiciones que se desee. Este diseño ubica los polos de lazo cerrado de modo que las condiciones transitorias sean llevadas a cero de forma preestablecida.

Sin embargo hay un costo asociado con colocar todos los polos en lazo cerrado, porque para realizarlo se requiere tener buenas medidas de todas las variables de estado o bien incluir un observador de estado en el sistema.

Existe un requisito por parte del sistema para poder realizar la asignación de polos en forma arbitraria, esta exigencia es que el sistema sea de estado completamente controlable [19].

A la hora de aplicar este método, hay que tener en cuenta ciertas cuestiones relacionadas con la implementación real de las soluciones:

1. Realización física.
2. Estabilidad.
3. Grados de los polinomios P y L .

CONCLUSIONES PARCIALES I

1. El electroimán Bruker Be-38 obtiene la magnitud física Inducción Magnética, utilizando sensores con los principios físicos de la Resonancia Magnética Nuclear de Pulsos (RMNP) y Efecto Hall, para realizar las mediciones de campo magnético.
2. Los controladores proporcionales Integrales (PI) presentan una ganancia infinita a una frecuencia igual cero, por lo que se denominan compensadores de atraso.
3. El diseño polinomial a través de la asignación de polos garantiza la ubicación de polos en el lazo cerrado de modo que las condiciones transitorias sean llevadas a cero.
4. Se explica la teoría de la solución del problema de la asignación de polos, forzando un integrador en el lazo de control, sustentado en el teorema de Sylvester.



“No hay más que asomarse a las puertas de la tecnología y la ciencia contemporánea, para preguntarnos si es posible vivir y conocer ese mundo del futuro sin un enorme caudal de conocimientos y preparación ”

Fidel Castro Ruz.

Capítulo 2

Capítulo 2: Diseño de un controlador polinomial para el electroimán Bruker Be-38.

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explican las características físicas y eléctricas del electroimán Bruker BE-38, que permite estimar el comportamiento de cada uno de los componentes de las partes del electroimán. Se realiza el diseño polinomial del controlador, se ajustan los parámetros del controlador y se evalúa la robustez del controlador.

2.1.Caracterización general del sistema magnético

El sistema magnético de la Oficina Territorial de Normalización se ocupa de reproducir la unidad de medida, el cual está constituido por un conjunto de componentes que se encargan de generar la corriente que se suministra a las bobinas generadoras del electroimán, controlar el valor de corriente suministrado y mantener la temperatura de trabajo con un sistema de circulación de agua, para que no existan cambios de temperatura superiores a ± 0.2 °C.

Las principales partes que lo componen son las siguientes:

1. Electroimán Bruker BE-38.
2. Fuente de alimentación Bruker B-HS 90.
3. Intercambiador de calor Bruker.
4. Sistema de enfriamiento FríoClima.

1. Electroimán Bruker modelo BE- 38.

El electroimán es la parte más costosa de un sistema para experimentos de RMN. El campo magnético es el encargado de eliminar la degeneración de los niveles de energía del espín nuclear. A mayores campos magnéticos, mayor dispersión de las señales en el espectro y mayor sensibilidad en los experimentos. Actualmente, la mayoría de los electroimanes son superconductores, es decir, su bobina está construida con espiras de diferentes aleaciones, embebidas en una matriz de cobre que presenta una resistencia casi nula cuando se enfrían a temperaturas cercanas al cero absoluto.

El electroimán Bruker modelo BE-38 (sistema investigado), se muestra en la Figura 2.1, el mismo posee un yugo cerrado, fabricado a partir de un material magnéticamente blando de acero ultra puro, que ha sido tratado térmicamente, los polos se encuentran firmemente atornillados al yugo. Las caras de los polos poseen un alto grado de paralelismo del orden de $1\ \mu\text{m}$.

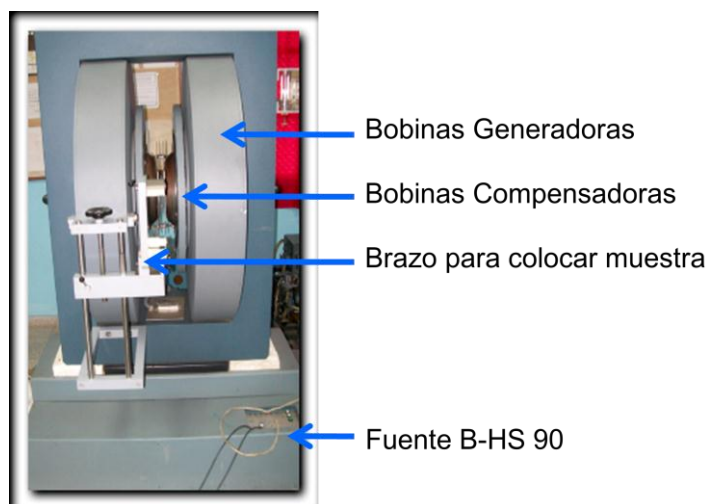


Figura 2.1. Partes de electroimán Bruker BE-38.

El electroimán tiene una configuración designada como “hf” (highfield) con una alta uniformidad del campo magnético en la región central del gap de aire. El diseño cónico de las piezas polares en la versión **hf**, reduce la densidad de flujo magnético en el yugo a un valor por debajo de la saturación magnética, y a su vez aumenta la homogeneidad del campo en el entrehierro de aire (región de interés). Esta característica, garantiza los altos valores de campo que se pueden alcanzar en el gap de aire del sistema.

El electroimán posee dos tipos de bobinas:

1. Bobinas compensadoras (no son objetos de análisis en este trabajo, además están desconectadas del Sistema Magnético).
2. Bobinas generadoras, las cuales son del tipo Helmholtz y están conectadas en serie (ambas pueden estar conectadas en serie o paralelo). Las cuales consisten en dos bobinas circulares de radio **R** y separadas por una distancia igual a su radio.

Las dimensiones de cada una de las piezas del electroimán, que fueron reportadas por el fabricante, y otras constatadas por el laboratorio durante la investigación. En la tabla 2.1 se reportan los datos mecánicos y eléctricos del electroimán.

Tabla 2.1. Datos mecánicos y eléctricos del electroimán Bruker B-E 38.

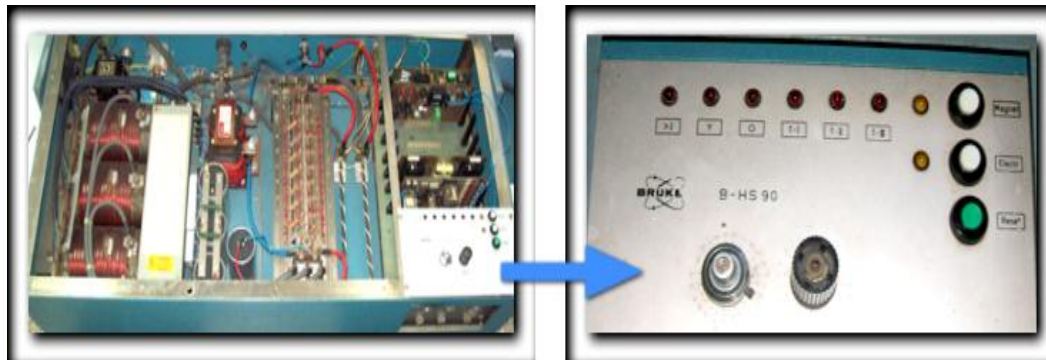
Mecánicos	
Diámetro de la cara polar (mm)	170
Diámetro de la base polar (mm)	310
Gap de aire (mm)	115.0
Distancia entre las bobinas (mm)	205
Dimensiones del yugo (H x A x P)	1190 x 824 x 350
Diámetro de la bobina (mm)	880
Eléctricos	
Numero de vueltas	2 x 400
Resistencia fría	2 x aprox. 0.35 Ω
Resistencia caliente	2 x aprox. 0.45 Ω
Material del enrollado	Alambre de Cu ahuecado
Diámetro exterior (mm)	7.5 x 7.5
Diámetro interior (mm)	4.5 x 4.5
Sección transversal del cobre (mm ²)	36
Resistencia/100 m (Ω)	0.049
Peso/100 m (kg)	32
Excitación máxima $H_{m\acute{a}x}$	1154 m ($I_{m\acute{a}x} = 50$ A) $P < 2.5$ kW

2. Fuente de alimentación estabilizada Bruker.

En el Anexo 3 se observa el panel de operación manual de la fuente de corriente B-HS 90, y la funcionalidad que posee cada una de las opciones, donde el usuario puede interactuar.

La fuente de alimentación B-HS 90, energiza y estabiliza el campo magnético en el electroimán. El circuito está equipado con un amplificador operacional, el cual posee valores de corriente extremadamente pequeños, para garantizar una estabilidad y seguridad durante la operación en mediciones de larga duración. En el circuito se produce una caída de tensión proporcional a la corriente en una resistencia shunt de manganina, material de muy baja sensibilidad a las fluctuaciones de temperatura, con valor de 0.01 Ω y un coeficiente térmico de $TK = 1 \times 10^{-6} / ^\circ C$, la cual es enfriada con agua. La tensión de referencia y la tensión de diferencia se suministran amplificadas al punto de regulación de una placa de transistores, que se encuentra

también enfriada por agua. La fuente de alimentación se encuentra debajo de las dos bobinas generadoras, en una gaveta deslizante, ver Figura 2.2.



a) b)
Figura 2.2. Fuente B-HS 90. a) Interior de la fuente. b) Ampliación del panel de Operación de la fuente.

Para regular las fluctuaciones del campo magnético, y las debidas a campos exteriores, los polos del electroimán se encuentran rodeados por dos bobinas para la medición de las tensiones inducidas por variaciones del flujo magnético. Durante las fluctuaciones del campo estas bobinas suministran una tensión de regulación proporcional a la derivada $\frac{dH_0}{dt}$ de la intensidad del campo.

La fuente era de punto fijo con una variación de tan solo el $\pm 5 \%$, donde se obtenía un campo de 1.5 T, esta se modificó para convertirla en una fuente variable en un rango de 0.1 T a 1.8 T, con un ajuste fino de aproximadamente $\pm 10 \%$, se puede considerar que estas son las características críticas de la fuente, y para valores de corriente en el extremo superior, mejoran las condiciones de estabilidad.

3. Sistema de Enfriamiento.

El electroimán disipa calor por la conversión de la corriente eléctrica en campo magnético, para no afectar el campo por las variaciones de temperatura y no se dañen los elementos de la fuente de corriente, se hace circular agua a una temperatura constante para lograr un equilibrio térmico en el electroimán. Esta agua proviene de un sistema de enfriamiento que garantiza la disipación de calor en la fuente y mantiene la correcta operación del mismo dentro del rango de trabajo 25 °C a 35 °C y posee dos partes fundamentales:

- ❏ **Sistema primario:** Es un sistema de refrigeración destinado a mantener la temperatura de un depósito exterior de agua, entre 12 °C y los 14 °C, estructuralmente consta de un sistema de recirculación de agua del sistema de refrigeración al depósito exterior.
- ❏ **Sistema secundario:** Es un intercambiador de calor, el cual posee un sistema de circulación de agua del depósito exterior, (que normalmente tiene una temperatura inferior) a un depósito interior y otro sistema de recirculación de agua del depósito interior al electroimán. La documentación reporta que las fluctuaciones de temperatura en el sistema secundario, son de ± 0.2 °C, sin que se vea afectado el campo magnético; experimentalmente se comprobó que las fluctuaciones pueden llegar hasta ± 0.4 °C.

2.2. Diseño polinomial del controlador

Para el diseño polinomial se considera la Figura 2.3 como el lazo de control del sistema magnético, que utiliza un controlador Proporcional Integral (PI), al cual se le aplica el método de asignación de polos para el ajuste de los parámetros.

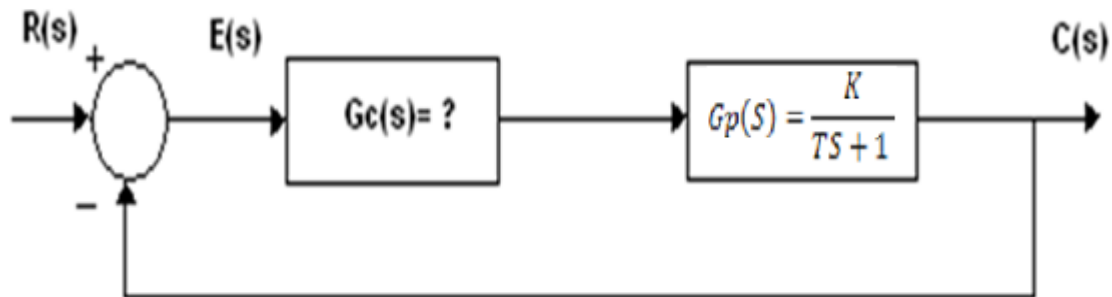


Figura 2.3 Lazo de control del electroimán.

Se tiene la función de transferencia de la planta:

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts+1}, \text{ de primer orden.} \quad (2.1)$$

T : Constante de Tiempo.

Se necesita diseñar un controlador que sea propio, y el **Teorema de Sylvester** dice que este diseño es posible mientras los polinomios $A(s)$ y $B(s)$ sean coprimos.

Aplicando el criterio práctico:

$ord(P(s)) = n - 1 = 1 - 1 = 0$; No puede ser $P(s)$ como una constante.

$$P(s) = p_0 \quad (2.2)$$

p_0 : Coeficiente de polinomio.

$ord(L(s)) = n = 1$; se escoge $L(s)$ teniendo en cuenta que es de orden 1.

$$L(s) = l_1 s + l_0 \quad (2.3)$$

l_1 : Coeficiente de polinomio.

l_0 : Coeficiente de polinomio.

$ord(A_{lc}(s)) = 2n = 2$; Polinomio de segundo orden con un par de polos.

$$A_{lc}(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (2.4)$$

ξ : Coeficiente de amortiguamiento.

ω_n : Frecuencia natural.

El polinomio resultante de segundo orden para $\omega_n = 1$ y $\xi = 0.707$ es:

$$s^2 + 1.414s + 1 = 0 \quad (2.5)$$

El mismo se escoge en dependencia a lo que se quiere lograr.

Calculando los valores polinomiales (p_0, l_1, l_0) del polinomio característico a lazo cerrado del controlador se tiene que:

$$L(s)A(s) + P(s)B(s) = A_{lc}(s) \quad (2.6)$$

Diseño algebraico del controlador:

$$(l_1 + l_0)(TS + 1) + p_0 K = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (2.7)$$

Multiplicando polinomios:

$$l_1 T S^2 (l_1 + l_0 T) S + l_0 + p_0 K = S^2 + 2\xi \omega_n S + \omega_n^2 \quad (2.8)$$

Se igualan los polinomios de iguales potencias:

$$l_1 T = 1 \quad (2.9)$$

$$l_1 + l_0 T = 2\xi \omega_n \quad (2.10)$$

$$l_0 + p_0 K = \omega_n^2 \quad (2.11)$$

Se obtiene que:

$$l_1 = \frac{1}{T} \quad (2.12)$$

$$l_0 = \frac{2\xi \omega_n}{T} - \frac{1}{T^2} \quad (2.13)$$

$$p_0 = \frac{\omega_n^2}{K} - \frac{2\xi \omega_n}{TK} + \frac{1}{T^2 K} \quad (2.14)$$

Sustituyendo para: $K = 10$ $T = 2$ $\omega_n = 1$ $\xi = 0.707$

$$l_1 = \frac{1}{T} = 0.5$$

$$l_0 = \frac{1.414}{T} - \frac{1}{T^2} = \frac{1.414}{2} - \frac{1}{4} = 0.707 - 0.25 = 0.457$$

$$p_0 = \frac{\omega_n^2}{K} - \frac{2\xi \omega_n}{TK} + \frac{1}{T^2 K} = 0.0543$$

El controlador queda de la forma siguiente:

$$G_c(s) = \frac{P(s)}{L(s)} \quad (2.15)$$

$$G_c(s) = \frac{0.0543}{0.5s + 0.457} \quad (2.16)$$

La función de transferencia a lazo cerrado es la siguiente:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{P(s)B(s)}{L(s)A(s)+P(s)B(s)} \quad (2.17)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.0543*10}{(0.5s+0.457)(2s+1)+0.543*10} \quad (2.18)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.543}{s^2+(0.5+0.914)s+0.457+0.543} \quad (2.19)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.543}{s^2+1.414s+1} \quad (2.20)$$

¿Cómo responde el sistema ante la entrada escalón unitario?

$$C(s) = \frac{0.543}{s^2+1.414s+1} * \frac{1}{s} \quad (2.21)$$

Como el sistema a lazo cerrado tiene salida de segundo orden y se desea que este alcance la entrada del sistema; es decir, que valor toma $C(s)$ cuando el tiempo es infinito.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sC(s) \quad (2.22)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{0.543}{s^2 + 1.414s + 1} * \frac{1}{s} = 0.543$$

Este resultado demuestra que se tiene un error a estado estacionario, el controlador a estado estacionario no cumple con el diseño. El error de este controlador es grosero, lo que indica que hay que añadir una acción integral.

$$E(s) = R(s) - C(s) \quad (2.23)$$

$E(s)$: Error.

$R(s)$: Referencia.

$C(s)$: Salida.

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2.24)$$

$$e(\infty) = 1 - 0.543 = 0.457$$

El error es del 50% del valor final por tanto es grosero y el tiempo de establecimiento (ts) del controlador:

$$ts = \frac{4}{\xi \omega_n} \text{(2.25)}$$

$$ts = \frac{4}{0.707 * 1} = 5.65$$

Este diseño no se corresponde con el objetivo trazado por lo que, no es conveniente su utilización. Dado que la respuesta del controlador no es satisfactoria y posee error estado estacionario.

Para restringir la solución de problema de asignación de polos, se fuerza un integrador en el lazo para que permita alcanzar error estático de posición nulo en la respuesta a la referencia.

Dado que la función de transferencia de la planta:

$$Gp(s) = \frac{K}{TS+1} = \frac{B(s)}{A(s)} \text{(2.26)}$$

$$Gp(s) = \frac{b_1s+b_0}{a_1s+a_n} \text{(2.27)}$$

Donde: $b_1 = 0$ se hace cero.

La función de transferencia es de primer orden ($n = 1$) y la función a lazo cerrado es la siguiente:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{GpGc}{1+GpGc} \text{(2.28)}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{P(s)}{SL(s)} * \frac{B(s)}{A(s)}}{1 + \frac{P(s)}{SL(s)} * \frac{B(s)}{A(s)}} \text{(2.29)}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{P(s)*B(s)}{SL(s)A(s)+P(s)B(s)} \text{(2.30)}$$

Se aplica el criterio práctico para:

$$G_c(S) = \frac{P(S)}{L(S)} \quad (2.31)$$

$$\text{ord}(P(S)) = \text{ord}(L(S)) = n - 1$$

$$\text{ord}(A_{lc}(S)) = 2n - 1$$

$$\text{ord}(P(S)) = n - 1$$

$$\text{ord}(L(S)) = n$$

$$\text{ord}(A_{lc}(S)) = 2n$$

A_{lc} : Se elige solo grado $2n$.

Para la siguiente función:

$$G_c(s) = \frac{P(s)}{SL(s)} \quad (2.32)$$

S : integrador.

$$\text{ord}(P(s)) = n$$

$$p_1s + p_0 \quad (2.33)$$

$$\text{ord}(L(s)) = n$$

$$l_1s + l_0 \quad (2.34)$$

$$\text{ord}(A_{clc}(s)) = 2n + 1 \quad \text{tercer orden}$$

A_{clc} : Se elige de grado mínimo $2\bar{n} - 1 = 2n + 1$.

$$A_{clc}(s) = (S + 4\xi\omega_n)(S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2) \quad (2.35)$$

$A_{clc}(s)$: Polinomio deseado a lazo cerrado del controlador.

$$SL(s)A(s) + P(s)B(s) = A_{clc}(s) \quad (2.36)$$

Diseño algebraico del controlador:

$$S(l_1S + l_0)(TS + 1) + (p_1S + p_0)K = A_{clc}(s) \quad (2.37)$$

Multiplicando polinomios:

$$Tl_1S^3 + (l_1 + Tl_0)S^2 + (l_0 + Kp_1)S + Kp_0 = S^3 + 6\xi\omega_nS^2 + \omega_n^2(1 + 8\xi^2)S + 4\xi\omega_n^3 \quad (2.38)$$

Se igualan los polinomios de iguales potencias:

$$Tl_1 = 1 \quad (2.39)$$

$$l_1 + Tl_0 = 6\xi\omega_n \quad (2.40)$$

$$l_0 + Kp_1 = (1 + 8\xi^2)\omega_n^2 \quad (2.41)$$

$$Kp_0 = 4\xi\omega_n^3 \quad (2.42)$$

$$\begin{bmatrix} T & 0 & 0 & 0 \\ 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & K & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_0 \\ p_1 \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 6\xi\omega_n \\ (1 + 8\xi^2)\omega_n^2 \\ 4\xi\omega_n^3 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Sustituyendo para: $K = 20.8$ $T = 2.06$ $\omega_n = 10$ $\xi = 0.707$

$$l_1 = 0.4854$$

$$l_0 = 20.36$$

$$p_1 = 23.05$$

$$p_0 = 4\xi\omega_n^3 = 136$$

El controlador queda de la forma siguiente:

$$G_c(S) = \frac{P(S)}{SL(S)} \quad (2.44)$$

$$G_c(S) = \frac{23.05s + 136}{0.4854s^2 + 20.36s}$$

La función de transferencia a lazo cerrado:

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{P(S)B(S)}{L(S)A(S)+P(S)B(S)} \quad (2.45)$$

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{23.05s+136}{S(0.4854s^2+20.36)(2.06s+1)+23.05s+136} \quad (2.46)$$

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{23.05s+136}{0.99s^4+0.4854s^3+41.94s^2+43.41s+136} \quad (2.47)$$

¿Cómo responde el sistema ante la entrada escalón unitario?

$$C(S) = \frac{23.05s+136}{0.99s^4+0.4854s^3+41.94s^2+43.41s+136} * \frac{1}{s} \quad (2.48)$$

Como el sistema a lazo cerrado tiene salida de tercer orden y se desea que esta alcance la entrada del sistema; es decir, que valor toma **C(s)** cuando el tiempo es infinito.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sC(S) \quad (2.49)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{23.05s + 136}{0.99s^4 + 0.4854s^3 + 41.94s^2 + 43.41s + 136} * \frac{1}{s} = 0$$

Este resultado demuestra que no hay error a estado estacionario ($e_{ss} = 0$), por tanto este controlador a estado estacionario cumple con el diseño requerido. Para el tiempo de establecimiento (**ts**) del controlador se tiene que:

$$ts = \frac{4}{\xi \omega_n} \quad (2.50)$$

$$ts = \frac{4}{0.707 * 10} = 0.28$$

Este diseño se corresponde con el objetivo trazado por lo que, es conveniente su utilización. Dado que la respuesta del controlador es satisfactoria, no posee error estado estacionario y el tiempo de establecimiento es pequeño.

Para el ajuste de los parámetros para la asignación de polos se parte de que, los procesos de primer orden dado por la función de transferencia:

$$G_p(s) = \frac{Kp}{1+sT} \quad (2.51)$$

Se controlan con un controlador Proporcional Integral (PI):

$$G_c(s) = k \left[1 + \frac{1}{sT_i} \right] \quad (2.52)$$

La función de transferencia a lazo cerrado del servo control está dada por la expresión siguiente:

$$M(s) = \frac{G_p G_c}{1 + G_p G_c} \quad (2.53)$$

Siendo el polinomio característico del sistema de control:

$$p(s) = s^2 + s \left(\frac{1+KpK}{T} \right) + \frac{KpK}{TT_i} \quad (2.54)$$

La condición de diseño de forma general:

$$p(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (2.55)$$

De manera que los polos de lazo cerrado se encuentren localizados en la ecuación 2.56:

$$\lambda_{1,2} = -\xi\omega_n T \pm j\omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.56)$$

Igualando (2.54) y (2.55) se obtiene que los parámetros requeridos del controlador sean:

$$K = \frac{2\xi\omega_n T - 1}{Kp} \quad (2.57)$$

$$T_i = \frac{2\xi\omega_n T - 1}{\omega_n^2 T} \quad (2.58)$$

Con estos parámetros en el controlador, la función de transferencia de lazo cerrado resultante es:

$$M(s) = \frac{\left(2\xi\omega_n - \frac{1}{T}\right)s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.59)$$

El sistema de control obtenido tiene los polos en la posición especificada y un cero en:

$$S = -\omega_n^2 \left(2\xi\omega_n - \frac{1}{T} \right) \quad (2.60)$$

Los ajustes de los parámetros del controlador, se analizan desde el resultado obtenido en el estudio de las características estáticas y dinámicas del electroimán. En el cual se obtiene de forma experimental el modelo analítico del electroimán con las siguientes características: sistema de primer orden con una ganancia de 20.8 y función de transferencia [12].

$$G_p(s) = \frac{20.8}{2.06s+1} \quad (2.61)$$

Calculando los parámetros de ajuste del controlador Proporcional Integral (PI) y sustituyendo en las ecuaciones (2.57) y (2.58):

Para: $\xi = 0.707$ $\omega_n = 10$ $k_p = 20.8$ $T = 2.06$

$$K(s) = \frac{2 * 0.707 * 10 * 2.06 - 1}{20.8} = 29.08$$

$$T_i(s) = \frac{2 * 0.707 * 10 * 2.06 - 1}{10^2 * 2.06} = 0.6$$

Resultados de los parámetros:

$K = 29.08$ y $T_i = 0.6$

La función de transferencia a lazo cerrado sustituyendo en la ecuación (2.59) es la siguiente:

$$M(s) = \frac{13.66s + 100}{s^2 + 14.14s + 100}$$

Por tanto, luego de obtenerse la función de transferencia del controlador mediante el diseño polinomial y ajustados los parámetros (K_p y T_i) del mismo para tener una respuesta transitoria adecuada, los datos del controlador son:

Función de transferencia:

$$G_c(s) = \frac{23.05s + 136}{0.4854s^2 + 20.36s}$$

Ganancia:

$$K = 29.08$$

Tiempo de integración:

$$T_i = 0.6$$

Tiempo de establecimiento: $t_s = 0.28$

Error estado estacionario: $e_{ss} = 0$

2.3.Simulación en el MATLAB V12.0

En los sistemas de control la realimentación tiene un efecto muy importante como lo es la reducción del error entre la variable controlada y el punto de consigna, sin embargo no es el único efecto que tiene sobre el sistema de control, ya que también tiene la característica de variar algunos parámetros del sistema como lo son la ganancia global, estabilidad, ancho de banda, margen de fase, perturbaciones y sensibilidad.

La diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida se la denominaseñal de error del sistema; esta señal es la que actúa sobre el sistema de modo de llevar la salida aun valor deseado. En otras palabras el término lazo cerrado implica el uso de acción derealimentación negativa para reducir el error del sistema.

La siguiente Figura 2.4 muestra el diagrama de bloque a lazo cerrado del sistema,para el cual se utiliza el software MATLAB V12.0 para la simulación. A través del mismo se introducen los valores de cada una de las funciones de transferencia (controlador y la planta), para después realizar la programación. Anexo 4.

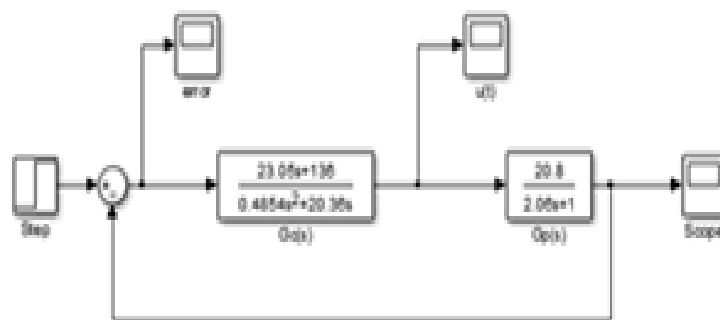


Figura 2.4 Simulación del lazo de control en MATLAB V12.0.

Luego de realizar la simulación en el MATLAB V12.0, se obtienen las respuestas del sistema ante la señal escalón unitario en la Figura 2.5, la señal de error a la entrada de la referencia en la Figura 2.6, la señal de error a la salida del controlador en la Figura 2.7.

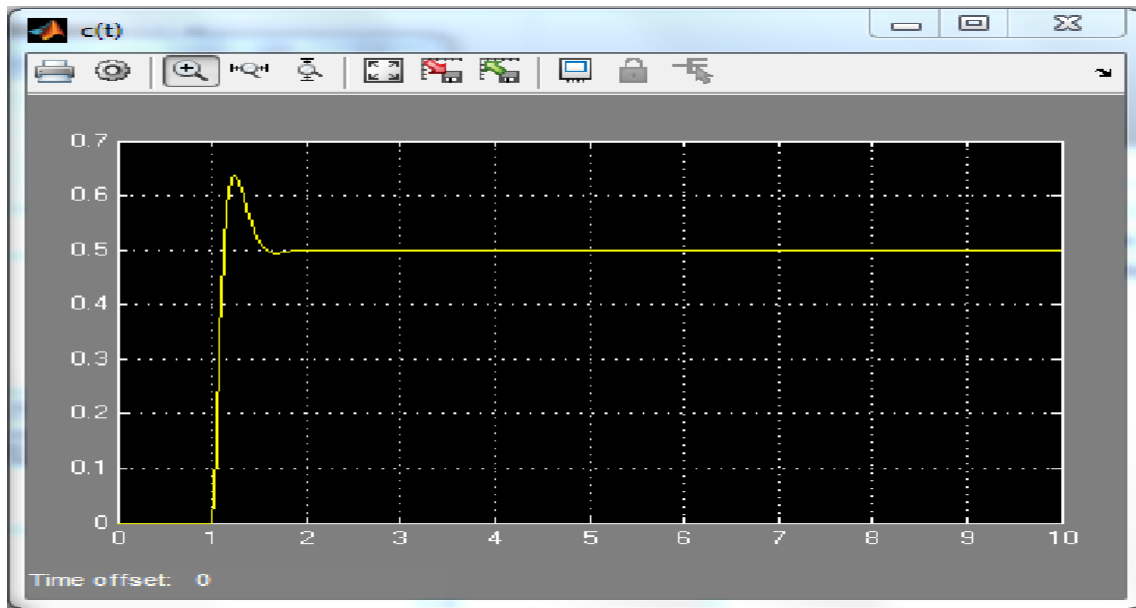


Figura 2.5 Respuesta del sistema ante la entrada escalón unitario.

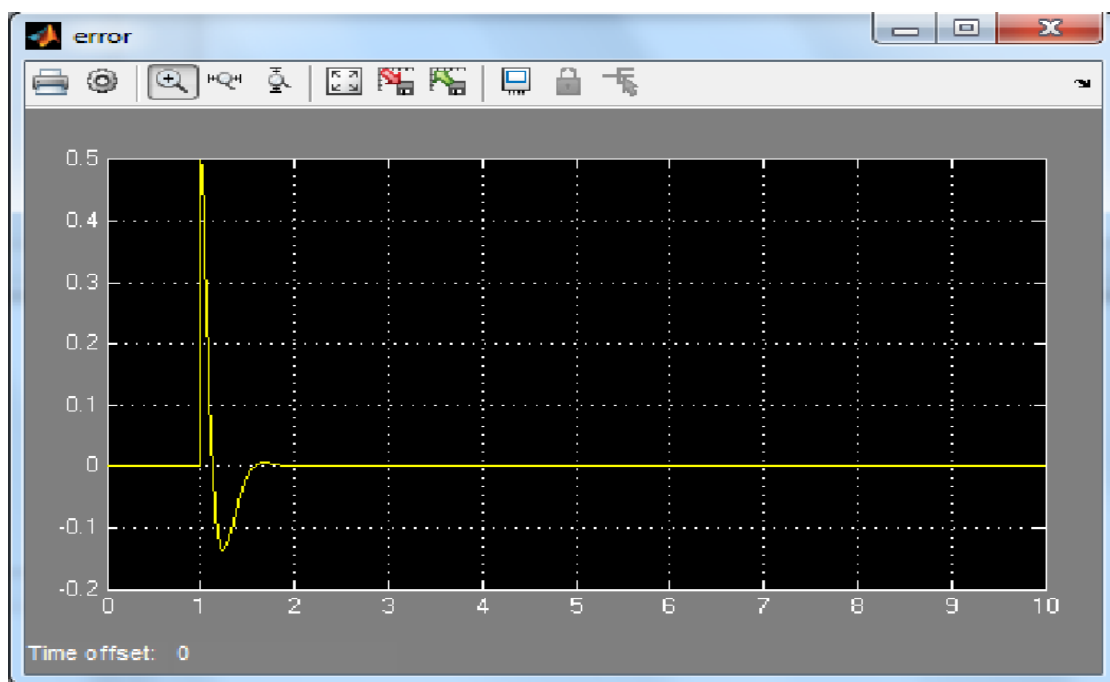


Figura 2.6 Señal de error a la entrada de la referencia.

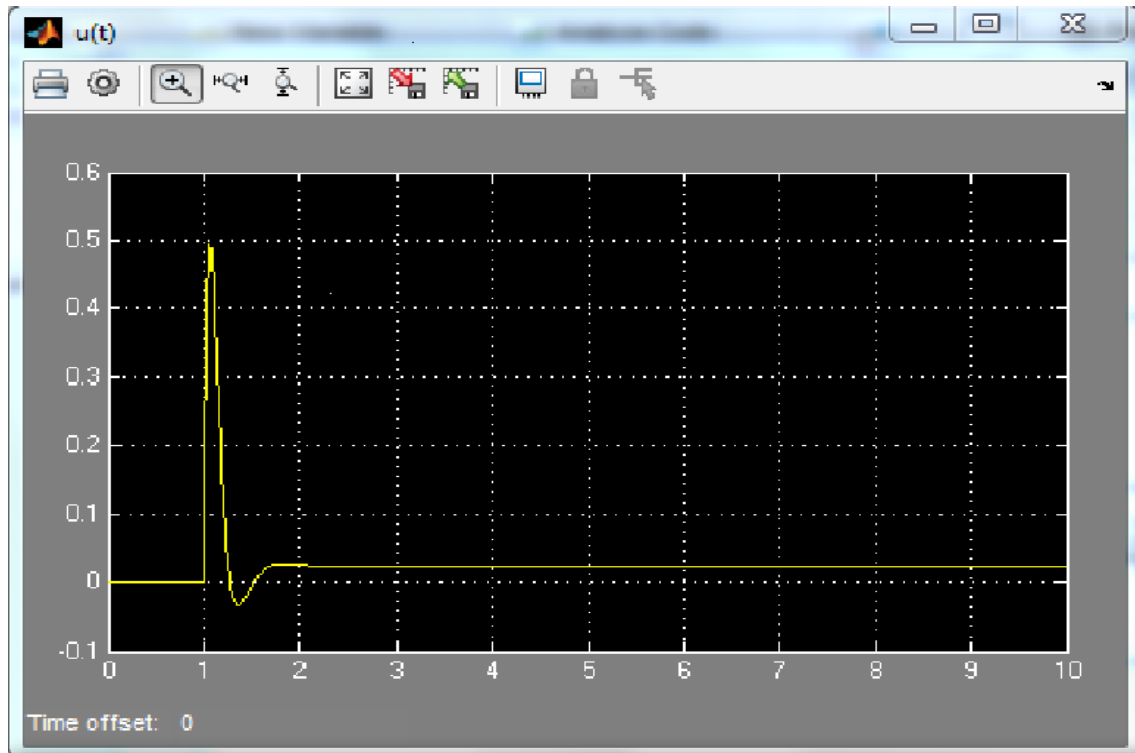


Figura 2.7 La señal de error a la salida del controlador.

Se puede afirmar después de analizar cada una de las respuestas del sistema, que posee una respuesta transitoria estable sin margen de error a estado estacionario con respecto a la señal de referencia, por lo que demuestra la estabilidad del sistema.

2.3.1. Robustez del controlador

Con el fin de obtener unas buenas prestaciones para el seguimiento y rechazo de señales periódicas y ser capaces de operar en un contexto de variación de parámetros. El análisis de la robustez se realiza sobre las condiciones de estabilidad, se construyen 9 diferentes modelos de la planta con los parámetros de ganancia (**K**) y la constante de tiempo (**T**) en los intervalos establecidos respectivamente (esto se puede realizar fácilmente empleando el Toolbox de control robusto de MATLAB V12.0, con los comandos *realpp* para la definición de los intervalos y el comando *psample* para la obtención de los 9 modelos de muestra). Con el comando del MATLAB se realiza el cálculo *Gpsamples(s)* para cada uno de los controladores y se procede a verificar las condiciones de estabilidad.

Conocer la robustez del controlador es importante, debido a que, de esta forma se conocerá como es la salida del sistema ante las variaciones antes mencionadas, que puedan ocurrir en el proceso.

Para evaluar este resultado se utiliza el MATLAB V12.0, donde la siguiente Figura 2.8 muestra la robustez del controlador variando la ganancia (**K**) y la constante de tiempo (**T**), ver el Anexo 5.

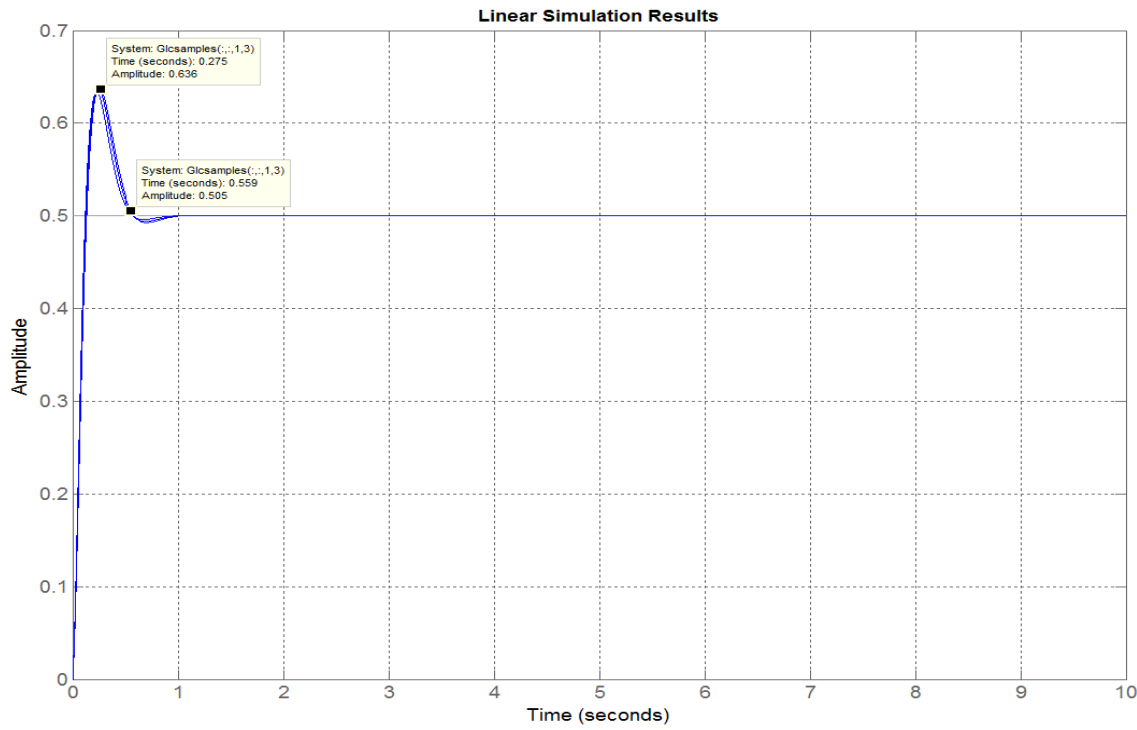


Figura 2.8 Robustez del controlador.

Lo que es posible deducir, que la respuesta del sistema ante las variaciones antes mencionadas no presenta diferencia alguna, es decir las amplitudes entre una variación y otras (9 respuestas) son tan pequeñas que no se alcanza ver prácticamente, solo si se hace una ampliación de la zona de sobrepaso, donde es prácticamente coincidente las curvas.

Por tanto, se tiene una estabilidad y respuesta robusta, lo que trae consigo un controlador robusto.

CONCLUSIONES PARCIALES II

1. Se garantiza la estabilidad de la respuesta del sistema ante la entrada escalón unitario, sin error a estado estacionario.
2. Se logra el diseño del controlador polinomial, con una ganancia global de **29.08**, un tiempo de integración de **0.6 s** y un tiempo de establecimiento de **0.52 s**.
3. Se logró la robustez del controlador polinomial con una buena estabilidad y respuesta utilizando el MATLAB V12.0.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se logró la solución del problema con la realización del diseño del controlador para el electroimán Bruker-38.
2. El diseño de controladores polinomiales a través de la asignación de polos garantizó la ubicación de polos en el lazo cerrado de modo que las condiciones transitorias sean llevadas a cero.
3. Se logró la solución del problema de la asignación de polos forzando un integrador en el lazo de control (Teorema de Sylvester).
4. Se garantiza el comportamiento estable del controlador mediante la estabilidad y precisión del sistema ante la entrada escalón unitario.
5. Se logra la robustez del diseño ante variaciones en la ganancia (K) y la constante de tiempo (T).

RECOMENDACIONES

1. Implementar el circuito impreso del controlador polinomial obtenido para el electroimán Bruker BE-38.
2. Utilizar las informaciones de esta investigación como material de consulta, para continuar con el estudio de los sistemas magnéticos en vista de explotar sus potencialidades.

BIBLIOGRAFIA

1. Arjón A. A., Mandujano E. N. Modelado matemático y control para levitación magnética. Universidad Autónoma de Zacatecas de Ingeniería Eléctrica, 2007.
2. Deás, D. "et al". Evaluación de los niveles de Campo Magnético Irradiados en Estimuladores Magnéticos Empleando MEF- 2D. Artículo publicado en FIE 2014.
3. DM044_MAD-XR_spanish.pdf. Sistema para Detección de Anomalías Magnéticas con Funciones Ampliadas.
4. Entrevista al profesor D.C. Fidel Gilart González, Prof. Consultante, Dpto. de Campos Magnéticos, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente, fgilart@cnea.uo.edu.cu, 2015.
5. Entrevista al profesor MSc. Alcibíades Lara Lafarge, Prof. Asistente, Dpto. de Campos Magnéticos, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente, lara@cnea.uo.edu.cu, 2015.
6. García E. Métodos Experimentales del magnetismo. Colectivo de autores, 1978.
7. Gilart F. Apuntes: Electromagnetismo enfocado al diseño y la explotación de dispositivos electromecánicos y generadores de campo magnético, 2015.
8. Gilart F. Conferencia 1: Electromagnetismo Básico enfocado hacia las ciencias médico-biológicas, 2015.
9. Gilart F. Conferencia 2: Los materiales magnéticos y sus características, 2015.
10. Gilart F. Conferencia 3: Caracterización magnética de materiales y de dispositivos generadores de campo magnético, 2015.
11. Holliday, D., Robert R. Física para estudiantes de ciencias e ingeniería. Segunda Edición Revisada, Corregida y aumentada. Parte 2. Edición Revolucionaria, 1975.
12. López A. O. Caracterización estática y dinámica de un electroimán. Trabajo de Diploma, Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automática. Santiago de Cuba 2015.
13. Matveev A.N, Electricidad y Magnetismo. Editorial Mir.1978
14. Ogata, K. Ingeniería de Control Moderna. Ediciones Castilla, Tomos 1 y 2, S.A, Madrid, 1980.
15. Reyes S. L. Rabilero M. Electricidad y Magnetismo. Editorial Pueblo y Educación. ISPJAE 1986.
16. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0202_EO.pdf
17. <http://centrodeartigo.com/revista-digital-educacion-tecnologia-educativa/15PID.pdf>
18. <http://centrodeartigo.com/revistadigitaleducaciontecnologiaeducativa/contencon-16361.html>

19. http://centrodeartigo.com/revistadigitaleducaciontecnologiaeducativa/marin_alfaro.conescapanXXVI.pdf
20. <http://ciep.ing.uaslp.mx/njjccontrol/images/pdf/4.capitulo%20ii.pdf>
21. http://csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/clase_slides_download/C09.pdf
22. <http://electroimn.blogspot.com/buenosabernaturaleza/acercadeelectroimanes.php>
23. <http://electrokadpdcetis.blogspot.com/2011/11/queesunelectroimanehistoria.html>
24. http://fisica.udea.edu.co/~labgicm/Instrumentacion/2014_levitador%20magnetico.pdf
25. http://fiuady-lab2.blogspot.com/37394_10603_asignacion_de_polos_oct-2010.pdf
26. http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/12572.pdf
27. <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/7044/1/tesis489.pdf>
28. http://www.cinvestav.mx/Portals/0/SiteDocs/Sec_Difusion/Anuarios/2003/control.pdf
29. http://www.epistemus.uson.mx/revistas/articulos/16art2_DISENODECONTRDISENODECONTRD.pdf
30. https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2056/catalogo_separacion.pdf

ANEXOS

ANEXO 1. Aplicaciones de los electroimanes.



Tren de levitación magnética.



Levantamiento de cargas de acero.



Alzamiento de latas de acero.

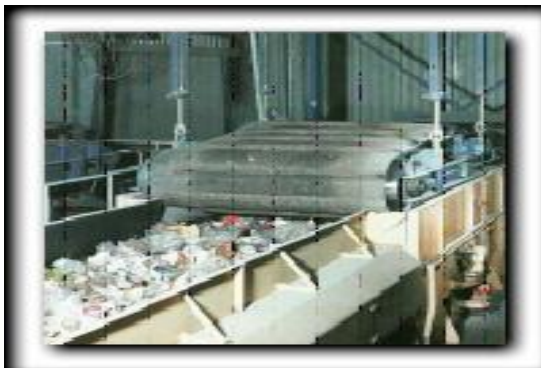


Instalación de Resonancia Magnética de Imágenes.

ANEXO 1. Aplicaciones de los electroimanes (continuación).



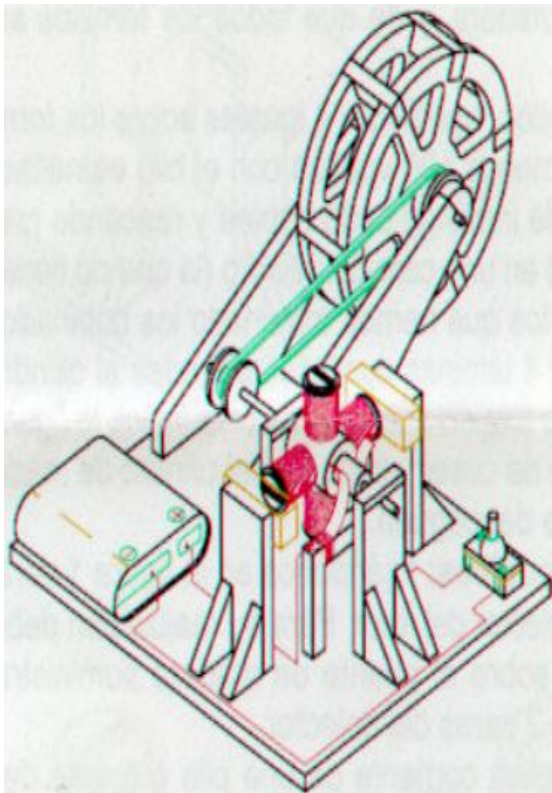
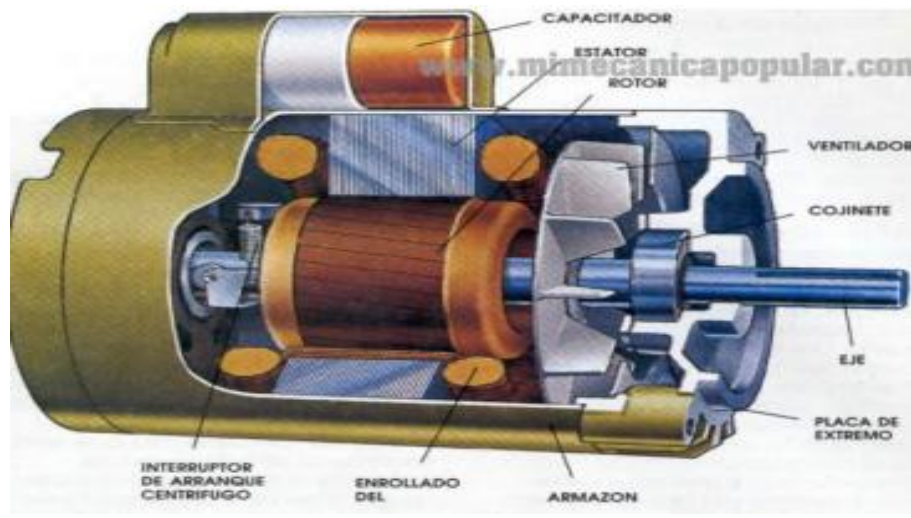
Pulpo manipulador de chatarra. Filtro magnético.



Sistema de banda para detectar residuos.

Banda magnética.

ANEXO 1. Aplicaciones de los electroimanes (continuación).

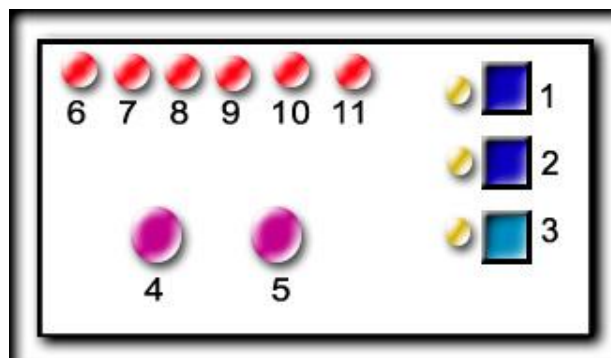


Motores eléctricos

ANEXO2.Vista lateral del electroimán Bruker BE-38 (continuación).



ANEXO3. Panel de operación manual de la fuente B – HS 90.



Opciones posibles a realizar	Funcionalidad
1. electroimán	Se aplica al electroimán una corriente CD en correspondencia con el valor ajustado en el potenciómetro. Se enciende el LED cuando circula corriente.
2. Electrónica	Interruptor principal. Conmuta a encendido los controles electrónicos de la fuente HS 90 y el intercambiador de calor. Se enciende el LED cuando circula corriente.
3. Resetear	Permite regresar al estado inicial luego de haber ocurrido un error en el procedimiento.
4. Potenciómetros variables	Se establece un valor grueso de corriente de salida para la fuente. Modificación Implementada). Ajuste grueso de 1 k Ω .
5. Potenciómetros variables	Se establece un valor fino de corriente de salida para la fuente. (Modificación Implementada). Ajuste fino de 1 k Ω .
• Potenciómetros en el mínimo. V = 1.4894 mV • Potenciómetros en el máximo V = 639.840 mV • Se puede medir mediante un Multímetro digital.	
Los siguientes LED's pilotos indican una condición de fallo, cuando se encuentran encendidos.	
6. Sobrecarga de Corriente, Corriente Máxima insuficiente para alcanzar el valor establecido.	
7. Relación trifásica inapropiada o existe una fase caída.	
8. Intercambiador de calor trabaja incorrectamente, chequear el nivel de agua.	
9. Transistor PS, donde la salida principal del transistor PS registra un nivel de temperatura muy alto, debido a flujo insuficiente de agua fría.	
10. Nivel de salida de corriente en los shim registra muy alta temperatura.	
11. Alta Temperatura ($\approx 60^{\circ}\text{C}$) en las bobinas del electroimán.	

ANEXO4.Programación en el MATLAB V12.0 (Diseño del controlador).

```
K=20.8;

T=2.06;

epsilon=0.707;

wn=10;

M1=[T 0 0 0;1 T 0 0;0 1 K 0;0 0 0 K]

VB=[1;6*epsilon*wn;(1+8*epsilon^2)*wn^2;4*epsilon*wn^3]

val=det(M1)

if val == 0

disp('No se puede calcular: Los Polinomios no son coprimos')

else

    X=inv(M1)*VB

    l1=X(1);l0=X(2);p1=X(3);p0=X(4);

disp('El controlador polinomial es:')

Gc=tf([p1 p0],[l1 l0 0])

end
```

ANEXO5.Robustez en el MATLAB V12.0.

`K=realp('K',20.8)`

K =

Name: 'K'

Value: 20.8000

Minimum: -Inf

Maximum: Inf

Free: 1

Real scalar parameter.

`T=realp('T',2.06)`

T =

Name: 'T'

Value: 2.0600

Minimum: -Inf

Maximum: Inf

Free: 1

Real scalar parameter.

`Gnoms=tf(K,[T 1])`

Gnoms =

Generalized continuous-time state-space model with 1 outputs, 1 inputs, 1 states, and the following blocks:

K: Scalar parameter, 1 occurrences.

T: Scalar parameter, 1 occurrences.

Type `"ss(Gnoms)"` to see the current value, `"get(Gnoms)"` to see all properties, and `"Gnoms.Blocks"` to interact with the blocks.

`Gpsamples=replaceBlock(Gnoms,'k',[20;20.8;21.6],'T',[1.9 2.06 2.16])`

Gpsamples =

1x3 array of generalized continuous-time state-space models.

Each model has 1 outputs, 1 inputs, 1 states, and the following blocks:

K: Scalar parameter, 1 occurrences.

Type "ss(Gpsamples)" to see the current value, "get(Gpsamples)" to see all properties, and "Gpsamples.Blocks" to interact with the blocks.

```
Glcsamples=feedback(Gc*Gpsamples,1)
```

Glcsamples =

1x3 array of generalized continuous-time state-space models.

Each model has 1 outputs, 1 inputs, 3 states, and the following blocks:

K: Scalar parameter, 1 occurrences.

Type "ss(Glcsamples)" to see the current value, "get(Glcsamples)" to see all properties, and "Glcsamples.Blocks" to interact with the blocks.

```
U=ones(1001,1)*0.5;
```

```
lsim(Glcsamples,U,[0:0.01:10])
```

grid