



UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
DEPARTAMENTO DE CONTROL AUTOMÁTICO

*Tesis en opción al grado académico de  
Maître en Automática*



# Caracterización Estática y Dinámica de un Electroimán

*Autora:* Ing. Osbeida López Almarales

*Tutores:* MSc. Miguel Fabars Zamora  
MSc. Hugo Domínguez Abreu

*Colaborador:* MSc. Henry Bory Prevez

Curso: 2015-2016  
"Año 57 de la Revolución"



UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
DEPARTAMENTO DE CONTROL AUTOMÁTICO

*Tesis en opción al grado académico de  
Máster en Automática*

# Caracterización Estática y Dinámica de un Electroimán

***Autora:*** Ing. Osbeida López Almarales

***Tutores:*** MSc. Miguel Fabars Zamora  
MSc. Hugo Domínguez Abreu

***Colaborador:*** MSc. Henry Bory Prevez

Curso: 2015-2016  
"Año 57 de la Revolución"



*" El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente  
un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento,  
porque precisamente es lo que más estamos sembrando,  
lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia".*

*Fidel Castro Ruz*

*Agradecimientos*

## AGRADECIMIENTOS

---

**¡Sin el apoyo de todos ustedes no hubiera podido terminar, gracias eternamente!**

- ❖ **A mis padres**, por darme la vida, ayuda y apoyo siempre, porque nunca me han exigido nada pero siempre han estado ahí esperando lo mejor de mí, sin reparar en sacrificios han asumido mis deberes, para que pudiese dedicarme a este trabajo. Siempre anhelo que disfruten mis éxitos estando presentes, pero prefieren siempre esperar resultados en casa para compartirlos en familia, GRACIAS POR EXISTIR.
- ❖ **A mi hijo** por esa alegría, esa luz que aporta a mi vida y ser la razón para superarme día tras día, siempre está a mi lado dándome todo su cariño, amor y felicidad y mis dos preciosas sobrinas. Espero que mi esfuerzo les sirva de ejemplo y aprendan que se puede crecer en sabiduría, solo es proponérselo y emprender el camino.
- ❖ A mi esposo, **MSc. Erick Osvaldo Rojas Falcón**, por estar a mi lado en todo momento, revisando y sugiriendo cada detalle de este trabajo; para poder terminar necesité mucha paciencia, comprensión y apoyo, sin embargo no me faltaron, eternas gracias. GRACIAS MI AMOR.
- ❖ A mi único hermano **Dr. Felipe López Almarales**, por ser el ejemplo de hombre laborioso, inteligente y estudioso, por ser el médico listo a servir lo mejor posible a nuestra familia y sociedad. TE EXTRAÑO MUCHO, MI MAYOR DESEO ES QUE ESTUVIERAS COMO SIEMPRE, PRESENTE EN MI DEFENSA DE MAESTRÍA.
- ❖ A toda mi familia, la razón por la que quiero ser aún mejor persona, para merecerlos.

Agradezco sinceramente a todos los que directa o indirectamente apoyaron en este trabajo. A mis amigos de FIE, porque puedo contar con ellos.

- ❖ A mi tutor y amigo **MSc. Miguel Fabars Zamora**, quien siempre ha estado orientando y exigiendo un buen resultado, por su apoyo incondicional y por todo el tiempo dedicado. GRACIAS PROFESOR.
- ❖ A mi tutor y amigo **MSc. Hugo Domínguez Abreu** con experiencia y sabiduría, siempre está dispuesto a orientar, a dedicar de su tiempo para contribuir en las investigaciones de la Universidad. GRACIAS PROFESOR.
- ❖ Al profesor **MSc. Alcibíades Lara Lafargue**, aunque no está en la portada como tutor lo es, por ser el líder del laboratorio de Magnetismo de la OTNSC, además es fundador y consultante de la tecnología existente allí. GRACIAS PROFESOR.
- ❖ Al profesor **DC. Fidel Gilart González**, por su esmerada atención, su acertada explicación en todo momento, siempre tuvo un espacio para revisar y orientar este trabajo.
- ❖ A los profesores de Automática, especialmente a **Michel Sanz Pérez, Jenrry Bory Prevez, José León Montoya, Luis Lamezón Alcolea, Julio Fong Barrio**, por toda la ayuda oportuna.
- ❖ A los compañeros del CNEA y de Biofísica Médica, fundamentalmente al profesor **DC. Alejandro Bordelois Cayamo, MSc. Alexander Pacau** de Biofísica Médica.
- ❖ A todos los profesores de la Maestría en Automática, por ser excelentes profesionales.
- ❖ A mis amigos de la maestría especialmente a **Katerine Estrada Leyva, Marianela Rodríguez Vicente, Otto Hen Rodríguez, Yuri Ramírez Carbonell, Alexis Jorge Peinado Artílez**.



*" El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente  
un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento,  
porque precisamente es lo que más estamos sembrando,  
lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia".*

*Fidel Castro Ruz*

## *Dedicatoria*

## DEDICATORIA

---

En este momento tan importante de mi vida, mi trabajo y mi esfuerzo se los dedico a ustedes.

- 💧 A mis padres Ana Irma y Felipe.
- 💧 A mi hijo Álvaro Javier.
- 💧 A mi hermano Felipe.
- 💧 A mi esposo Erick Osvaldo.



*" El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente  
un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento,  
porque precisamente es lo que más estamos sembrando,  
lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia".*

*Fidel Castro Ruz*

## *Resumen*

## RESUMEN

---

El trabajo consiste en la caracterización e identificación analítica y experimental del 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 conocer el comportamiento dinámico del sistema y obtener su modelo matemático. Para su obtención se realizaron varios experimentos utilizando la señal del tipo paso escalón en diferentes puntos de operación del proceso, siguiendo una metodología con la técnica de identificación, permitiendo estudiar el sistema desde la óptica de la modelación, para posteriormente diseñar estrategias de control y estimar variables derivadas de los campos magnéticos. Se analizan los principales aspectos teóricos relacionados con los electroimanes, la identificación experimental de proceso, los datos de entrada-salida del sistema, se estiman los parámetros para diferentes estructuras, y luego se selecciona la más adecuada para representar la dinámica del proceso. Se validan los modelos, mediante el mejor ajuste y el análisis de los residuos donde se estiman los parámetros para diferentes estructuras, y finalmente se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos. En el desarrollo de este trabajo se utilizaron los programas LABVIEW 6.0 (para adquirir los datos), y el MATLAB 7.8 (para obtener el modelo).



*" El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente  
un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento,  
porque precisamente es lo que más estamos sembrando,  
lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia".*

*Fidel Castro Ruz*

# *Índice*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

---

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                                                 | <b>1</b>  |
| <b>CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS MAGNÉTICOS.....</b> | <b>5</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                                                 | <b>5</b>  |
| 1.1. Fundamentos de los sistemas magnéticos .....                                         | 5         |
| 1.1.1. Materiales ferromagnéticos.....                                                    | 6         |
| 1.1.2. Antecedentes de los electroimanes .....                                            | 9         |
| 1.1.3. Análisis de las ecuaciones físicas de los electroimanes .....                      | 11        |
| 1.1.4. Aplicaciones de los electroimanes .....                                            | 18        |
| 1.1.5. Publicaciones sobre la utilización de los sistemas magnéticos.....                 | 19        |
| 1.3. Identificación dinámica y sus antecedentes .....                                     | 28        |
| 1.3.1. Modelo de un sistema dinámico.....                                                 | 29        |
| 1.3.2. Identificación de sistemas .....                                                   | 31        |
| 1.3.3. Técnicas de identificación paramétrica y tipos de modelos paramétricos.....        | 34        |
| 1.3.4. Métodos para el ajuste de parámetros.....                                          | 35        |
| <b>Conclusiones Parciales I.....</b>                                                      | <b>39</b> |
| <b>CAPÍTULO II. MODELO DINÁMICO DEL ELECTROIMÁN .....</b>                                 | <b>40</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                                                 | <b>40</b> |
| 2.1. Caracterización general del sistema magnético.....                                   | 40        |
| 2.2.Especificaciones para preparar las mediciones por el método de RMNP.....              | 43        |
| 2.3.Modelo a régimen estacionario del electroimán .....                                   | 44        |
| 2.4.Histéresis del electroimán Bruker BE-38 .....                                         | 49        |
| 2.4.1.Análisis de la inductancia del electroimán .....                                    | 50        |
| 2.4.2.Análisis de la permeabilidad relativa aparente del electroimán.....                 | 53        |
| 2.5.Modelo analítico del electroimán Bruker BE-38 .....                                   | 54        |
| 2.6.Caracterización del electroimán (planta).....                                         | 56        |
| 2.6.1.Interfaz de la computadora con la tarjeta PCL-711B y el gaussímetro .....           | 58        |
| 2.7.Modelo experimental para el electroimán mediante técnicas de identificación .....     | 59        |
| 2.7.1.Análisis de los datos del Experimento 1 .....                                       | 61        |

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.7.2.Análisis de los datos del Experimento 3 .....                                 | 63        |
| 2.7.3.Filtrado discreto de los datos del los Experimento 1 .....                    | 64        |
| 2.7.4.Selección mediante técnicas de identificación de las estructuras ARX .....    | 65        |
| 2.7.5.Estimación de los resultados de las estructuras ARX .....                     | 69        |
| 2.7.6.Obtención de modelos ARX para el Experimento 3 con el escalón construido..... | 72        |
| 2.8.Validación y comparación de los resultados .....                                | 75        |
| 2.8.1.Propuesta de los mejores modelos para el electroimán .....                    | 77        |
| <b>Conclusiones Parciales II.....</b>                                               | <b>79</b> |
| <b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>                                                  | <b>81</b> |
| <b>RECOMENDACIONES.....</b>                                                         | <b>81</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                                           | <b>82</b> |
| <b>ANEXOS</b>                                                                       |           |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.1.</b> Ciclo de histéresis de un material magnéticamente blando. ....                            | 8  |
| <b>Figura 1.2.</b> Ciclo de histéresis de un material magnéticamente duro. ....                              | 9  |
| <b>Figura 1.3.</b> Sistema magnético. ....                                                                   | 12 |
| <b>Figura 1.4.</b> Región lineal de B frente a H. ....                                                       | 15 |
| <b>Figura 1.5.</b> Ciclo de histéresis completo para un material ferromagnético. ....                        | 16 |
| <b>Figura 1.6.</b> Estimulador Magnético Local (NAK-03). ....                                                | 20 |
| <b>Figura 1.7.</b> Tren de pasajeros. ....                                                                   | 21 |
| <b>Figura 1.8.</b> Diagrama esquemático del sistema de levitación magnética. ....                            | 22 |
| <b>Figura 1.9.</b> Sistema de levitación magnética. a) Esquema eléctrico. b) Circuito eléctrico. ....        | 22 |
| <b>Figura 1.10.</b> Esquema en bloques del Sistema Magnético. ....                                           | 23 |
| <b>Figura 1.11.</b> Módulo ME-105. ....                                                                      | 24 |
| <b>Figura 1.12.</b> Partes principales de la tecnología de RMN. ....                                         | 25 |
| <b>Figura 1.13.</b> Muestra sometida a un Campo Magnético. ....                                              | 25 |
| <b>Figura 1.14.</b> gaussímetro modelo 475 DSP. ....                                                         | 26 |
| <b>Figura 1.15.</b> Ilustración del Efecto Hall. ....                                                        | 27 |
| <b>Figura 1.16.</b> Sistema dinámico con entrada $u(t)$ , perturbación $e(t)$ y salida $y(t)$ . ....         | 31 |
| <b>Figura 1.17.</b> Proceso de obtención de un modelo mediante la identificación. ....                       | 32 |
| <b>Figura 1.18.</b> Esquema del proceso de identificación. ....                                              | 33 |
| <br>                                                                                                         |    |
| <b>Figura 2.1.</b> Partes del electroimán Bruker BE-38. ....                                                 | 41 |
| <b>Figura 2.2.</b> Fuente B-HS 90. ....                                                                      | 42 |
| <b>Figura 2.3.</b> Gráfica del modelo estático del electroimán con todos los datos del experimento. ....     | 45 |
| <b>Figura 2.4.</b> Gráfica de la zona lineal del electroimán. ....                                           | 47 |
| <b>Figura 2.5.</b> Escala de trabajo del gaussímetro. ....                                                   | 47 |
| <b>Figura 2.6.</b> Lazo de histéresis del electroimán y su ampliación del paso por cero. ....                | 50 |
| <b>Figura 2.7.</b> Comparación de los resultados de las simulaciones y las mediciones de $B$ . ....          | 52 |
| <b>Figura 2.8.</b> Inductancia del electroimán en función de la intensidad de la corriente. ....             | 52 |
| <b>Figura 2.9.</b> Permeabilidad magnética del electroimán en función de la intensidad de la corriente. .... | 54 |
| <b>Figura 2.10.</b> Circuito RL con fuente de corriente directa. ....                                        | 55 |

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2.11.</b> Diagrama de la planta (entrada-salida).....                                       | 57 |
| <b>Figura 2.12.</b> Planta formada por el conjunto: actuador, planta y sensor. ....                   | 57 |
| <b>Figura 2.13.</b> Interfaz de la computadora con el sistema de medición. ....                       | 57 |
| <b>Figura 2.14.</b> Entrada escalón del Experimento 1. ....                                           | 61 |
| <b>Figura 2.15.</b> Conjunto de datos de entrada-salida filtrado del Experimento 1.....               | 62 |
| <b>Figura 2.16.</b> Datos de entrada-salida con el filtrado del Experimento 1 sin offset.....         | 62 |
| <b>Figura 2.17.</b> Conjunto de datos de entrada-salida filtrado del Experimento 3.....               | 63 |
| <b>Figura 2.18.</b> Conjunto de datos de entrada-salida filtrado del Experimento 3 sin el offset..... | 64 |
| <b>Figura 2.19.</b> Conjunto de datos filtrados de entrada-salida del Experimento 1. ....             | 65 |
| <b>Figura 2.20.</b> Gráfica del Osciloscopio de la señal de entrada y salida. ....                    | 65 |
| <b>Figura 2.21.</b> Voltaje de Entrada del experimento 1 para estimación con la estructura ARX. ....  | 66 |
| <b>Figura 2.22.</b> Selección del orden de los parámetros según los criterios AIC y MDL.....          | 67 |
| <b>Figura 2.23.</b> Estimación del voltaje. ....                                                      | 69 |
| <b>Figura 2.24.</b> Gráfica de los polinomios ARX con su ajuste (marx1, marx2, marx3, marx4). ....    | 70 |
| <b>Figura 2.25.</b> Gráfica de los polinomios ARX con su ajuste (marx5, marx6, marx7, marx8). ....    | 71 |
| <b>Figura 2.26.</b> Gráfica de los mejores ajustes ARX (marx2, marx4, marx7). ....                    | 72 |
| <b>Figura 2.27.</b> Gráfica del escalón de subida para un ARX con $n_a=1$ , $n_b=1$ , $n_k=1$ .....   | 73 |
| <b>Figura 2.28.</b> Gráfica del escalón de bajada para un ARX con $n_a=1$ ; $n_b=1$ ; $n_k=1$ .....   | 74 |
| <b>Figura 2.29.</b> Mejores ajustes ARMAX2 y ARX4. ....                                               | 76 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

---

- Anexo 1:** Aplicaciones de los electroimanes.
- Anexo 2.** Vista lateral del electroimán Bruker BE-38.
- Anexo 3.** Gap de aire del electroimán para colocar los sensores.
- Anexo 4.** Pares de bobinas Helmholtz.
- Anexo 5.** Modelo 3D del electroimán Bruker BE-38 construido en Comsol Multiphysics.
- Anexo 6.** Dimensiones exteriores del electroimán Bruker BE-38. a) Yugo, b) Base.
- Anexo 7.** Dimensiones de las bobinas Helmholtz del electroimán Bruker BE-38.
- Anexo 8.** Dimensiones de los polos del electroimán. a) Polos vista frontal, b) Polos vista lateral.
- Anexo 9.** Panel de operación manual de la fuente B – HS 90.
- Anexo 10.** Modificación realizada en la fuente del electroimán.
- Anexo 11.** Sensor de Resonancia Magnética Nuclear y brazo para colocar la muestra.
- Anexo 12.** Cabezal porta muestras.
- Anexo 13.** Combinaciones de muestras con su valor de campo y de frecuencia.
- Anexo 14.** Brazos y sus cabezales para distintas combinaciones de muestras.
- Anexo 15.** Método de medición por Resonancia Magnética Nuclear de Pulsos (RMNP).
- Anexo 16.** Registro de mediciones por el método de RMNP régimen estático.
- Anexo 17.** Registro de mediciones por el método de RMNP régimen estático.
- Anexo 18.** Registro de mediciones por el método de Efecto Hall régimen estático.
- Anexo 19.** Programa que analiza los datos a régimen estacionario.
- Anexo 20.** Análisis estático del electroimán con todos los datos del experimento por Efecto Hall.
- Anexo 21.** Análisis estático del electroimán con los datos de la zona lineal por Efecto Hall.
- Anexo 22.** Análisis estático del electroimán con los datos de la zona de saturación.
- Anexo 23.** Registro de mediciones del lazo de histéresis utilizando el Efecto Hall y la gráfica.
- Anexo 24.** Programa para graficar la inductancia y la permeabilidad magnética relativa aparente.
- Anexo 25.** Curva BH del acero con bajo contenido de carbono 1006.
- Anexo 26.** Mapa de la inducción magnética en el yugo magnético del electroimán.
- Anexo 27.** Tarjeta PCL 711S.
- Anexo 28.** Conector auxiliar del gaussímetro.
- Anexo 29.** Instrumentación para obtener la medición de campo magnético.

- Anexo 30.** Sistema de medición con la caja de resistencia, gaussímetro y multímetro digital.
- Anexo 31.** Software en LabVIEW para capturar las mediciones.
- Anexo 32.** Experimento 1: Mediciones a régimen dinámico (279 datos).
- Anexo 33.** Experimento 2. Mediciones a régimen dinámico (226 datos).
- Anexo 34.** Punto de operación del Experimento 2.
- Anexo 35.** Conjunto de datos de entrada-salida del Experimento 2.
- Anexo 36.** Datos de entrada-salida del Experimento 2 sin la componente de offset.
- Anexo 37.** Experimento 3 a régimen dinámico (390 datos).
- Anexo 38.** Programa 1 que prepara los datos medidos para procesarlos (prepdatosident.m).
- Anexo 39.** Programa 2 que prepara los datos para identificar (progident.m).
- Anexo 40.** Programa 3 que prepara los datos para identificar (progidentcont.m).
- Anexo 41.** Programa 4 para validar los modelos (valldent.m).
- Anexo 42.** Análisis de la correlación y los residuos para el modelo ARX (marx4).
- Anexo 43.** Análisis de la correlación y los residuos para el modelo ARX (marx7).
- Anexo 44.** Análisis de la correlación y los residuos para el modelo ARMAX.
- Anexo 45.** Programa 5 que prepara los datos para identificar (escalón arriba).
- Anexo 46.** Programa 6 que prepara los datos para identificar (escalón abajo).
- Anexo 47.** Programa 7 para obtener los modelos y graficar estructuras.
- Anexo 48.** Programa 8 para obtener la mejor estructura.
- Anexo 49.** Experimento 3: escalón de subida.
- Anexo 50.** Experimento 3: escalón de bajada.
- Anexo 51.** Experimento 3: escalón de subida.
- Anexo 52.** Experimento 3: escalón de bajada.
- Anexo 53.** Experimento 3: escalón de subida.
- Anexo 54.** Experimento 3: escalón de bajada.
- Anexo 55.** Experimento 3: escalón de subida.
- Anexo 56.** Experimento 3: escalón de bajada.
- Anexo 57.** Publicación 1: VI Conferencia Electromagnetismo Aplicado, CNEA 2015.
- Anexo 58.** Publicación 2: VI Conferencia Electromagnetismo Aplicado, CNEA 2015.



*" El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente  
un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento,  
porque precisamente es lo que más estamos sembrando,  
lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia".*

*Fidel Castro Ruz*

# *Introducción*

## INTRODUCCIÓN

---

El modelo de un sistema, como representación de sus aspectos fundamentales en la forma más conveniente para la finalidad a que está destinado, puede quedar expresado en forma de un conjunto de ecuaciones, tablas, gráficos o incluso de reglas que describen su operación. Poseer un modelo de un sistema para su análisis es muy útil, y en particular, para el control, porque la inmensa mayoría de los métodos se basan en su conocimiento. A la determinación de dicho modelo, a partir de tener algún conocimiento previo sobre el proceso y de experiencias prácticas, se le conoce como identificación.

Es precisamente la identificación de sistemas dinámicos una herramienta mediante la cual es posible la estimación de dichos modelos, partiendo del análisis de datos experimentales, mediciones y observaciones del sistema. A través de esta técnica es posible obtener la estructura y parámetros de un modelo matemático, que reproduzca con suficiente exactitud, para los fines deseados de Control Automático, las características dinámicas del proceso. Para llegar a la definición de un modelo matemático, existen técnicas que mantienen su vigencia, tal es el caso del análisis de los procesos por la vía analítica, mediante la cual se aplican las leyes físicas que describen el proceso.

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.

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.

La espectroscopía de RMN se ha convertido en una poderosa herramienta para el estudio de las propiedades físico-químicas de las sustancias, siendo una técnica empleada principalmente en la esclarecimiento de estructuras moleculares, aunque también se puede emplear con fines cuantitativos. Con su desarrollo esta técnica ya se emplea como una herramienta no destructiva de la muestra y lo suficientemente exacta y rápida, como para ser capaz de monitorear un proceso de calidad en una industria.

Entre las aplicaciones más usuales de la espectroscopía en la industria, se encuentran:

- Las mediciones del contenido de sólidos de grasa parcialmente cristalizadas.
- La determinación de aceite y agua en emulsiones.
- La determinación de humedad en varios productos.
- La determinación simultánea y no destructiva de agua y aceite en semillas.
- La determinación del contenido de agua y grasa en carnes, huevos, leche, productos lácteos, grasa y aceites comestibles, cereales, azúcar, cacao, chocolate y café.

Todo producto fabricado está sometido a un proceso de normalización para obtener el conocimiento exacto de los parámetros de éste y verificar que cumpla con los requisitos que normalizan la calidad del producto. Uno de los métodos más fiables a nivel mundial para realizar estos análisis es la espectroscopía de RMN. 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 100 000 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. Cuba también importa productos desde el extranjero, y debe pagarle a un tercero para verificar y garantizar la calidad de este. Todas estas pruebas y mucho más pudiesen hacerse dentro del país, ahorrándole al mismo ese gasto innecesario.

Es obligatorio para mejorar las prestaciones de la tecnología existente, tener las características técnicas, estáticas y dinámicas, con fines de control, que permitan un mejor aprovechamiento de la instalación. Lo planteado justifica la necesidad de resolver el siguiente problema:

**Problema de la Investigación:** Desconocimiento del comportamiento estático y dinámico para diferentes regímenes de operación del electroimán, perteneciente al laboratorio de Mediciones Magnéticas de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba.

**Objeto de la Investigación:** El modelado con fines de control de sistemas magnéticos.

**Objetivo de la Investigación:** La obtención del modelo matemático con fines de control, del electroimán perteneciente al laboratorio de Mediciones Magnéticas de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba.

**Campo de Acción de la Investigación:** La caracterización de electroimanes mediante la aplicación de técnicas analítica y experimental.

**Hipótesis de la Investigación:** Si se obtiene un modelo matemático, se tendría conocimiento de las características estáticas y dinámicas del electroimán, se podrían diseñar estrategias de control, hacer estimaciones de la variable a controlar, perfeccionar la tecnología empleada en el laboratorio de Mediciones Magnéticas de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba con el propósito de realizar análisis a sustancias químicas por el método de la espectroscopía aprovechando las potencialidades del electroimán.

#### **Tareas y Etapas de la Investigación:**

1. Caracterizar gnoseológicamente, históricamente y en la actualidad, los electroimanes.
2. Caracterizar el electroimán (Bruker BE-38) perteneciente al Patrón Nacional de Inducción Magnética.
3. Diseñar los experimentos para la identificación experimental.
4. Obtener el modelo (analítico y experimental) del electroimán.
5. Caracterizar estática y dinámicamente el electroimán.
6. Obtener valoraciones de expertos sobre los resultados de la identificación del electroimán.

#### **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:**

Es necesario para aumentar las prestaciones de la tecnología, conocer las características técnicas, estáticas y dinámicas que permitan un funcionamiento óptimo de la instalación. El desarrollo de esta investigación, proporciona las características estáticas con los mejores puntos de operación y el comportamiento dinámico del electroimán Bruker BE-38. Con las respuestas obtenidas, a partir del modelo identificado (para la corriente y el campo magnético), se profundizan los conocimientos acerca del proceso y se proporciona una buena predicción de la variable en diferentes situaciones. El modelo 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 de recurrir al proceso real, sin poner

en riesgo el equipo. Una estrategia de control que permita aumentar las prestaciones del equipo, donde puedan realizarse ensayos de espectroscopía, 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.

La principal significación que se tendría si se lograra un modelo matemático, es diseñar estrategias de control en trabajos posteriores para el electroimán, 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.

El informe, para una mejor comprensión, está organizado de la siguiente manera:

- **Una introducción** donde se presentan los objetivos y el problema que originó la necesidad de realización del trabajo y dos capítulos que constan de introducciones y conclusiones parciales, para la mejor comprensión de los mismos, estos se encuentran organizados por epígrafes que muestran la solución del problema planteado en la investigación.
- **En el primer capítulo** se caracteriza el objeto y campo de la investigación. Se estudian, los antecedentes del campo magnético, electroimanes con sus aplicaciones, los sistemas magnéticos y el fundamento teórico; los métodos de medición y su principio físico.
- **En el segundo capítulo** se caracteriza el electroimán Bruker BE-38, así como el funcionamiento a partir de todos los datos técnicos y físicos. Se analiza la modificación hecha a la fuente, el cálculo de la inductancia y la permeabilidad magnética relativa absoluta, la preparación de las mediciones y el lazo de histéresis presente en el electroimán. Además se muestran los resultados obtenidos en las mediciones y la discusión de estos analizando los modelos matemáticos (analítico y experimental). Se presenta todo el procesamiento en MATLAB de los datos para la identificación experimental.
- **Las conclusiones generales** son el resultado de las conclusiones parciales de cada capítulo, resumiendo los aportes principales del trabajo que demuestran su valor práctico y se adecuan al objetivo general de la tesis.
- **Las recomendaciones** están dirigidas al desarrollo de futuras investigaciones sobre esta temática, para perfeccionar y aumentar la calidad del trabajo en el laboratorio.
- **Los anexos** muestran claramente las evidencias del cumplimiento del objetivo fundamental del informe.



*" El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente  
un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento,  
porque precisamente es lo que más estamos sembrando,  
lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia".*

*Fidel Castro Ruz*

# *Capítulo 1*

## **CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS MAGNÉTICOS**

---

### **INTRODUCCIÓN**

El origen del magnetismo es muy antiguo, se remonta a más de 3500 años, en los países de Egipto, China y la India. En la edad del hierro, se descubrió que una piedra especial, la magnetita o imán natural, atraía las limaduras de hierro e incluso se adhería a los objetos de este metal (Holliday & Resnick, 1975).

Aunque estos efectos se conocían desde tiempos antiguos, muy poco se conocía sobre su origen y menos aún, de su conexión con los efectos eléctricos. Para el año 1820, los científicos consideraban que el magnetismo y la electricidad eran dos fenómenos separados que no guardaban relación alguna, sin embargo, las investigaciones aportadas por los descubrimientos de Oersted, demostraron que las corrientes eléctricas producían efectos magnéticos, mientras que los trabajos de Henry y Faraday demostraron que se podían producir corrientes eléctricas mediante determinados efectos magnéticos. Uno de los beneficios prácticos de estos descubrimientos, es el electroimán, el cual fue inventado independientemente, por Joseph Henry (científico norteamericano), y William Sturgeon, (físico inglés), alrededor del año 1825, hoy es considerado uno de los grandes inventos de los tiempos modernos (Reyes, 1986).

La relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos que se desprenden de estos descubrimientos fueron agrupados en una teoría unificada, rigurosa y coherente, por el científico escocés James Maxwell quien al publicar su obra en 1865, creó una verdadera revolución en el ámbito científico de la época, poniendo de relieve la posibilidad de existencia de las ondas electromagnéticas. (Reyes, 1986).

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; haciendo referencia al principio físico que se utilice para hacer los experimentos. Finalmente se caracterizan los aspectos más importantes de la identificación experimental de sistemas.

### **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 (Holliday & Resnick, 1975), (Reyes, 1986).

### **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 (Matveev, 1978), (Garcia, 1986).

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

**(1.4)**

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

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

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  $\mu$ , definida como:

**(1.5)**

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}}$$

Los materiales magnéticos que son fácilmente magnetizados tienen alta permeabilidad magnética, cuando el campo aplicado es muy intenso, el valor de la magnetización  $\mathbf{M}$  tiende al valor de saturación, y el material se satura, no hay posibilidad de que  $\mathbf{M}$  crezca aunque  $\mathbf{H}$  se incremente, pues todos los dominios están orientados paralelos al campo (Matveev, 1978), (García, 1986).

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

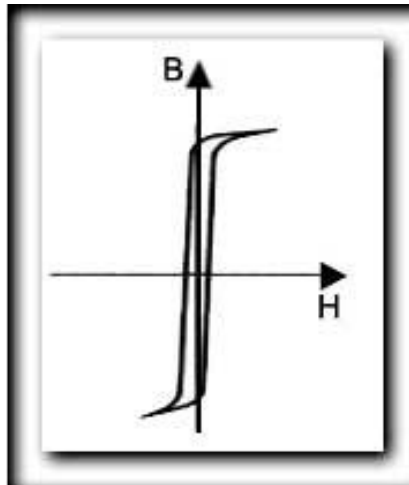
1. Materiales magnéticamente blandos.
2. Magnéticamente duros.

### **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 (Gilart, 2015).

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.

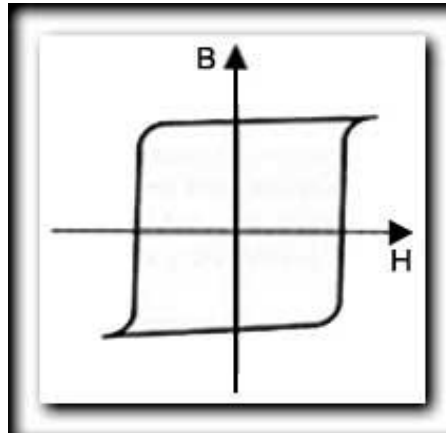
Un valor bajo de coercitividad corresponde al movimiento fácil de las paredes de dominios en respuesta a los cambios de dirección del campo. Los defectos estructurales tales como la presencia de partículas de una fase no magnética o bien de poros en el material magnético, tienden a restringir el movimiento 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 (Garcia, 1986).

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 (Gilart, 2015).
- ❏ **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 (Gilart, 2015).

## 2. Materiales magnéticamente duros.

Se caracterizan por una alta fuerza coercitiva **H<sub>c</sub>** y una alta inducción magnética remanente **B<sub>r</sub>**; 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. (Garcia, 1986)

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<sub>c</sub>** pueden ser del orden de  $5 \cdot 10^4$  A/m, y aun 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.

(<http://electroimn.blogspot.com/>, <http://electrokadpd-cetis.blogspot.com/2011/11/que-es-un-electroiman-e-historia.html>),  
([https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/2056/catalogo\\_separacion.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2056/catalogo_separacion.pdf)), (<http://electrokadpd-cetis.blogspot.com/2011/11/que-es-un-electroiman-e-historia.html>)

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.

Uno de los diseños más conocidos son los electroimanes Bitter. En la historia de la creación de potentes electroimanes, un lugar de honor le corresponde al físico norteamericano Francis Bitter, nacido en la ciudad de Weehawken del estado de Nueva Jersey, en 1902. 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 (<http://centrodeartigo.com/revista-digital-educacion-tecnologia-educativa/contenido-16361.html>), (<http://www.librosmaravillosos.com/tresmilenariosdeliman/capitulo06.html>).

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 de 1.2, 1.3, 20, 50 (toneladas), creciendo así la potencia de los electroimanes.

Estos electroimanes se utilizan también en el transporte, así, para que las ruedas de las vagonetas se adhirieran 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 (<http://bueno-saber.com/aficiones-juegos-y-juguetes/ciencia-y-naturaleza/acerca-de-electroimanes.php>).

Los electroimanes aparecieron en gran número en laboratorios físicos, salones aristocráticos y consultorios médicos. Empezaron a utilizarlos incluso, en fábricas de confección en las máquinas, en el calzado magnético de los cosmonautas, para estudiar sustancias colocadas en campos intensos, entre otros ([http://centrodeartigo.com/articulos-enciclopedicos/article\\_88357.html](http://centrodeartigo.com/articulos-enciclopedicos/article_88357.html)).

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. No se puede decir que esa lucha de los físicos contra el hierro saturable fuese muy exitosa, 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.

Electroimanes superconductores pueden producir campos magnéticos más fuertes, pero están limitados a los campos de 10 T a 20 T, debido al flujo de corriente. Para los campos más fuertes se utilizan electroimanes solenoides resistivos del diseño Bitter. Su desventaja es que requieren corrientes muy altas de accionamiento, y disipar grandes cantidades de calor.

([http://ecuacioneuropa.eu/health/scientific\\_committees/opinions\\_layman/es/camposelectromagnetism07/index.htm](http://ecuacioneuropa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/camposelectromagnetism07/index.htm)), (<http://centrodeartigo.com/revista-digital-educacion-tecnologia-educativa/contenido-16361.html>), (<http://electroimn.blogspot.com/>), (<http://electrokadpd-cetis.blogspot.com/2011/11/que-es-un-electroiman-e-historia.html>)

Con los grandes avances tecnológicos, aparecen los electroimanes que son capaces de alcanzar campos magnéticos del orden de los 35 T (tesla) y superiores, pero requiriendo de un elevado consumo eléctrico, no obstante se puede ver que en muchos países están puestos en práctica.

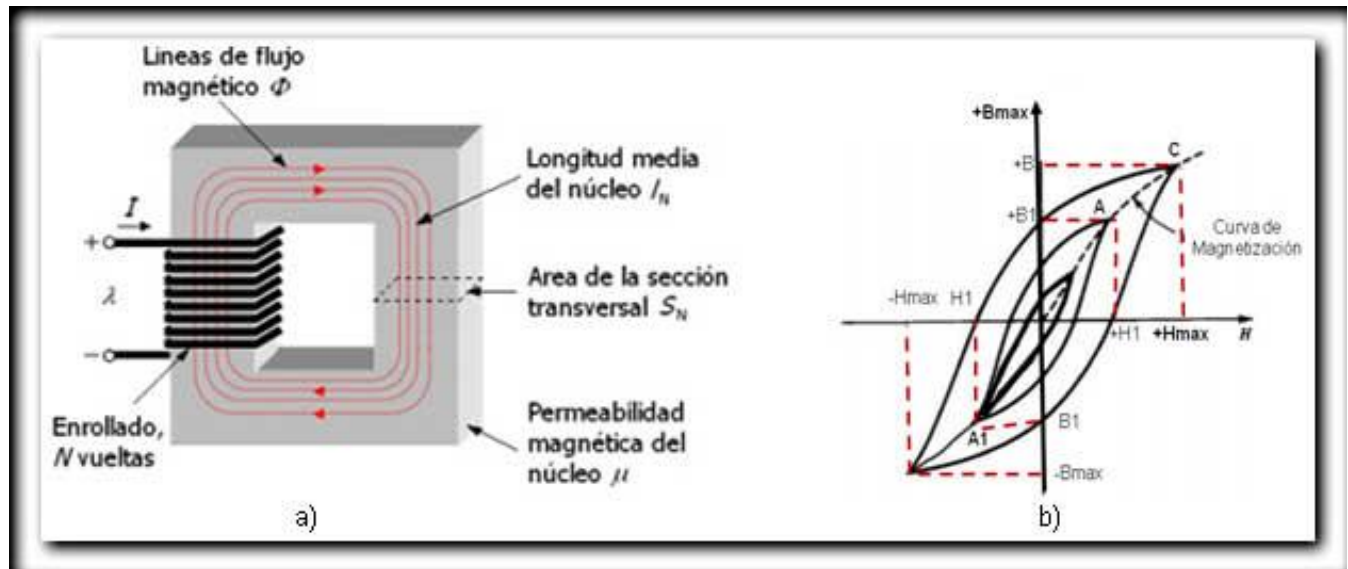
A partir de 2011 el Laboratorio Nacional de Alto Campo Magnético en Tallahassee, Florida, EE.UU, se alberga el imán resistivo más fuerte del mundo. Este sistema tiene una intensidad de campo máxima de 36.2 T y consiste en cientos de placas de Bitter separadas. Es interesante conocer que el campo magnético más fuerte que utiliza corriente continua hecho por el hombre es de 45 T, se consigue con un dispositivo híbrido que consiste en un imán Bitter dentro de un imán superconductor.

### **1.1.3. Análisis de las ecuaciones físicas de los electroimanes**

---

En la Figura 1.3 a) se muestra como un electroimán tiene diferentes partes, las cuales tienen funcionalidad a partir que se le suministra una corriente por las bobinas. Lo que implica que se obtenga la curva normal de magnetización y se muestra en la gráfica **B** contra **H**, Figura 1.3 b). La curva normal de magnetización, se llama al lugar geométrico de los vértices de los lazos histerésicos para distintas intensidades de campo. La medición comienza con una **H** mínima. Después de establecer la corriente **I<sub>1</sub>** correspondiente a la **H<sub>1</sub>**.

El flujo magnético ( $\Phi$  símbolo) es una propiedad de cualquier campo vectorial; se refiere a una superficie hipotética que puede ser cerrada o abierta. Es el número de líneas de fuerzas magnéticas que atraviesan una superficie perpendicularmente (Holliday & Resnick, 1975).



**Figura 1.3.** Sistema magnético. a) Aplicando corriente directa. b) Curva normal de magnetización como lugar geométrico de los vértices de los lazos histerésicos.

**Para simplificar el análisis 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 (Holliday & Resnick, 1975):

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

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 (**Fm**) dado en ampere-vuelta.

Suponiendo que un núcleo formado por un material con una permeabilidad muy alta, la densidad del flujo magnético es uniforme en todo éste, por lo que la expresión anterior puede ser simplificada de la siguiente forma:

$$F = HI = Ni \quad (1.7)$$

Manteniendo la suposición anterior se puede decir que:

$$\Phi = \frac{F}{\mathfrak{R}} \quad (1.8)$$

Siendo  $\Phi$  el flujo magnético en weber, y  $\mathfrak{R}$  es la reluctancia en ampere-vuelta por metro la cual se define mediante la siguiente expresión:

$$\mathfrak{R} = \frac{l_c}{\mu A} \quad (1.9)$$

Donde  $l_c$  es la longitud del camino medio del núcleo dado en metros,  $A$  es el área de la sección transversal del núcleo en metros cuadrados y  $\mu$  es la permeabilidad absoluta en weber por ampere-vuelta-metro o su equivalente henry por metro.

La permeabilidad de materiales ferromagnéticos  $\mu$  puede ser expresada en términos de permeabilidad relativa  $\mu_r$  y la relación entre ambas, viene dada por la permeabilidad del espacio libre o vacío ( $\mu_0$ ) en henry por metro, mediante la siguiente relación:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.10)$$

Los materiales usados en transformadores y máquinas rotatorias poseen la permeabilidad relativa con valores típicos de rango entre 2000 y 80 000.

Se define la densidad de flujo magnético expresado en weber por metro cuadrado o tesla como:

([http://www.uco.es/grupos/1.4 Flujo magnético](http://www.uco.es/grupos/1.4_Flujo_magnetico))

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (1.11)$$

Sustituyendo la ecuación 1.7 y 1.9 en la ecuación 1.8 se tiene la siguiente expresión para el flujo magnético:

$$\Phi = \mu A \frac{Ni}{l_c} \quad (1.12)$$

Sustituyendo y simplificando esta última expresión en la ecuación 1.11 se obtiene:

$$B = \mu \frac{Ni}{l_c} \quad (1.13)$$

Realizando el despeje de la ecuación 1.7 se plantea la intensidad del campo magnético de la siguiente forma:

$$H = \frac{Ni}{l_c} \quad (1.14)$$

Luego comparando esta ecuación 1.14 con la ecuación 1.13 es posible relacionar la intensidad del campo magnético con la densidad de flujo:

$$B = \mu H \quad (1.15)$$

Se define el flujo magnético concatenado como:

$$\psi = N\phi \quad (1.16)$$

Para circuitos magnéticos que tienen una relación lineal de **B** y **H** debido a la alta constante de permeabilidad magnética y baja reluctancia de su núcleo se puede definir la relación entre  $\lambda$  (es el enlace de flujo magnético a través de las bobinas) e **i** como la inductancia:

$$L(x) = \frac{\lambda}{i} \quad (1.17)$$

**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 (Reyes, 1986).

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 1.4 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.

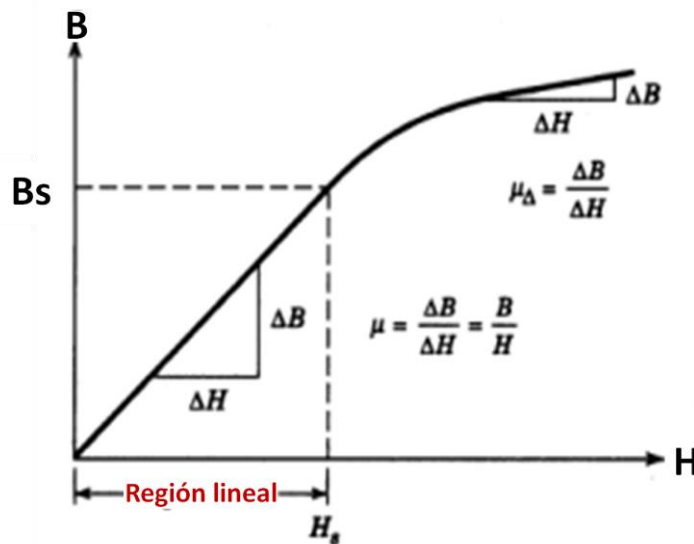


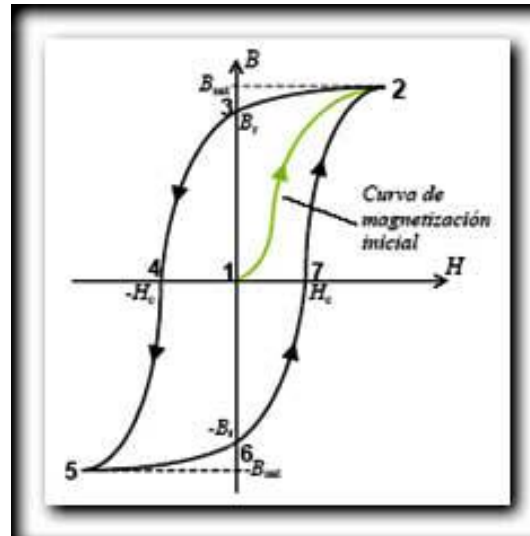
Figura 1.4. Región lineal de B frente a H.

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 1.5, o sea disminuye más lentamente. Cuando el campo  $H$  es cero, existe un campo residual  $B_r$  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 1.5.** 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.

Las propiedades magnéticas de los materiales dependen de su composición química, su fabricación, y del tratamiento térmico que se le aplique. Algunas propiedades tales como la saturación magnética, cambia muy poco solamente con la composición química y usualmente no es afectada por el modo de fabricación o tratamientos térmicos; sin embargo la permeabilidad y la fuerza coercitiva muestran cambios extremos entre todas las propiedades físicas, cuando se producen cambios por impurezas o por tratamientos térmicos. Los principales factores físicos-químicos que afectan estas propiedades son: composición (granos), impurezas, tensión, estructura cristalina, orientación del cristal y la temperatura. De todos ellos el único que produce efectos de interés en las mediciones, y se ha de tener en cuenta por su correlación con la magnitud de la inducción magnética, es la temperatura, esto se debe a la calidad del núcleo (Reyes, 1986).

## 2. Período transitorio del electroimán.

Todos los dispositivos eléctricos y electrónicos poseen un “período transitorio”, durante el cual ocurren una serie de efectos dinámicos transitorios que alteran los valores que se reproducen. Este tiempo es un parámetro a partir del cual se puede estimar cuando es que un sistema ha alcanzado su equilibrio dinámico.

La temperatura es un parámetro que influye en las características magnéticas de los materiales, ya que al aumentar en un sólido, se produce un aumento en la magnitud de las vibraciones térmicas de los átomos, y los momentos magnéticos atómicos pueden girar. Es por ello que al aumentar la temperatura, el incremento de la agitación térmica de los átomos tiende a desalinearse los momentos magnéticos. Para comenzar las mediciones se trabaja cuando el sistema está en equilibrio térmico.

### **3. 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 (Ricardo, 2008):

$$Ih_{campo} = \frac{\Delta \bar{B}}{\bar{B}} \quad (1.18)$$

Donde  $Ih_{campo}$  es la inhomogeneidad del campo,  $\Delta \bar{B}$  es la variación del campo magnético y  $\bar{B}$  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.

### **4. 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.

#### 1.1.4. 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. ([http://fisica.udea.edu.co/~lab-gicm/Instrumentacion/2014\\_levitador%20magnetico.pdf](http://fisica.udea.edu.co/~lab-gicm/Instrumentacion/2014_levitador%20magnetico.pdf))
- ❖ **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.

- **Los alternadores.** Son máquinas generadoras de corriente alterna, por oposición a la dinamo, que produce corriente continua. Si se introduce un imán en la espira formada por un conductor, aparece en éste una corriente eléctrica que se opone a dicha introducción. Por el contrario al sacarlo, cambia la corriente de sentido en el conductor y tiende a retenerlo. En estos fenómenos de inducción se fundamenta el alternador. El rotor del alternador tiene numerosos electroimanes, ciertos alternadores de centrales térmicas dan una potencia útil de 125 000 kW y hasta 250 000 kW. Giran a razón de 3000 rpm y son refrigerados por hidrógeno.

### **1.1.5. Publicaciones sobre la utilización de los sistemas magnéticos**

---

El amplio desarrollo que ha tenido el uso de los sistemas magnéticos aumenta significativamente, en diferentes áreas y procesos tecnológicos, elaborando para diferentes procesos industriales, diversas maneras de puesta en práctica, tales son los ejemplos de diferentes autores que han publicado trabajos alrededor de esta temática como son:

#### **1. Sistema para detección de anomalías magnéticas con funciones ampliadas.**

Se han diseñado programas que responden a una electrónica que se ajusta a la detección de campos magnéticos. Tal es el caso del Sistema para Detección de Anomalías Magnéticas con funciones ampliadas (MAD) y el programa denomina MAD-XR. Muchos países se sirven de esta tecnología, como la India, Australia, Canadá entre otros. Se utiliza por las fuerzas militares de todo el mundo. La mayoría de estos sistemas se han instalado en aeronaves para guerra antisubmarina, incluyendo tanto aviones como helicópteros, y se han usado principalmente, para detectar en forma de separación lateral y vertical (indicación izquierda/derecha), en el punto de abordaje más cercano (CPA). Este nuevo algoritmo da acceso a una trayectoria de vuelo táctica recomendada con el fin de optimizar la localización y detección del blanco. El MAD-XR es un sistema totalmente integrado que incluye un módulo sensor (que alberga los altamente sensibles magnetómetro vectorial y sensor escalar) y la unidad de interfaz. El sistema es ideal para las instalaciones en las cuales el tamaño, el peso y el consumo de energía son una preocupación (DM044\_MAD-XR\_spanish.pdf).

Posee algunos componentes como es un sensor escalar, magnetómetro de campo total para monitorear el campo magnético de la tierra y detectar los cambios que crean las anomalías magnéticas. Además tiene un magnetómetro vectorial que monitorea los vectores transversales, longitudinales y verticales del campo magnético de la tierra con relación a la posición y orientación de la aeronave para compensar las maniobras de dicha aeronave.

**Aplicaciones:** Se utiliza para la detección de objetos metálicos ocultos en el suelo, una vez montado en algún tipo de vehículo terrestre o aéreo, podría detectar una variedad de blancos, tales como vehículos blindados o de artillería. El sistema MAD es capaz de detectar objetos metálicos a través de paredes, enterrados o escondidos en cubiertas forestales densas.

## **2. Tratamiento magnético del agua.**

Desde el año 1945 se planteó por el belga Theo Vermerien la importancia del tratamiento magnético del agua. Es conocido el hecho de que antes de 1959 se comenzara a introducir en Cuba esta tecnología, pero no es hasta finales de los años 70 que en diferentes partes del país se comenzó a estudiar el fenómeno y a construir equipos magnetizadores, utilizados en sistemas intercambiadores de calor, destilerías, lavadoras de botellas y otros, con el fin de prevenir y eliminar las incrustaciones salinas.

Se realizó una investigación sobre el Tratamiento Magnético del Agua (TMA) y su efecto en una muestra de calderas del sector de Salud Pública de la provincia Santiago de Cuba. En el mismo se exponen algunas recomendaciones para la correcta selección e instalación de los equipos magnetizadores que garanticen el funcionamiento efectivo de éstos, y un análisis de los beneficios obtenidos en tres años de trabajo en diez calderas de baja presión de Salud Pública, de la provincia de Santiago de Cuba (Núñez, 2001).

El empleo de este tratamiento magnético del agua, constituye una opción alternativa para las calderas y sistemas de enfriamiento en la totalidad de los casos, además resulta básica la elección adecuada del dispositivo magnetizador de acuerdo con la instalación en particular. En estas calderas se logró eliminar total o parcialmente las viejas incrustaciones e impedir la formación de otras nuevas, también disminuir el costo y el tiempo de mantenimiento.

## **3. Estimulador magnético local (NAK-03).**

Los estimuladores magnéticos son desarrollados y contruidos en el CNEA. El modelo Nak-03 cuyos inductores en forma de discos han sido estudiados y publicados a diferencia de los aplicadores en forma de puntero o lapicero, diseñados con posterioridad para aplicaciones especiales terapéuticas, donde se necesite una determinada intensidad de campo focalizada en un punto, o sea para una región del cuerpo muy puntual, Figura 1.6. Los niveles de campo irradiados por este puntero magnético, de amplio uso terapéutico en regiones del cuerpo tan sensibles como la cara (Déas, 2014).



**Figura 1.6.** Estimulador Magnético Local (NAK-03).

En varias instituciones de prestigio internacional se han realizado estudios sobre los efectos biológicos de los campos electromagnéticos, destacándose los estudios en rehabilitación y recuperación, específicamente mediante la magnetoterapia. El objetivo de los mismos es producir campos magnéticos de baja frecuencia con niveles de radiación permisibles y que no afectan la salud humana, por el contrario son empleados con fines terapéuticos en el tratamiento de diferentes patologías. Esta técnica la viene desarrollando hace varios años el Centro Nacional de Electromagnetismo aplicado (CNEA) de la Universidad de Oriente y otras líneas de interés para el país, el cual se comporta como centro rector de las investigaciones vinculadas al magnetismo en el país.

#### **4. Publicación sobre un levitador magnético.**

Es un tema que ha ganado importancia en los últimos años, gracias a las múltiples aplicaciones que se le pueden dar, como por ejemplo, el tren de levitación magnética, o MAGLEV, es un tren suspendido en el aire por encima de una vía, entre 10 mm y 15 cm, siendo propulsado hacia adelante por medio de las fuerzas magnéticas (atractivas y repulsivas). La ausencia de contacto físico entre el carril y el tren hace que la única fricción sea la del aire, por lo que pueden conseguir muy altas velocidades, Figura 1.7, (Arjón & Mandujano, 2007).



**Figura 1.7.** Tren de pasajeros.

La levitación magnética es, sin lugar a dudas, un fenómeno que siempre ha cautivado la imaginación del ser humano. Hoy en día, se conocen unos cuantos mecanismos físicos que permiten sostener un objeto físico sin contacto mecánico alguno con el suelo. No obstante, cuando se pretende utilizar este atractivo fenómeno con interés científico o tecnológico, aparecen serias dificultades. Una de ella radica en que una mínima perturbación sobre el objeto levitante lo expulsa irreversiblemente de su posición de equilibrio, y otra es, que requieren un enorme aporte de energía, (Arjón & Mandujano, 2007).

El objetivo principal es regular la posición de una esfera de metal, en levitación. Mediante el diseño de un control de levitación magnética, donde se desea controlar la corriente de un electroimán la cual determina la posición a la que se eleva una bola de metal. El esquema general del sistema se representa en la Figura 1.8.

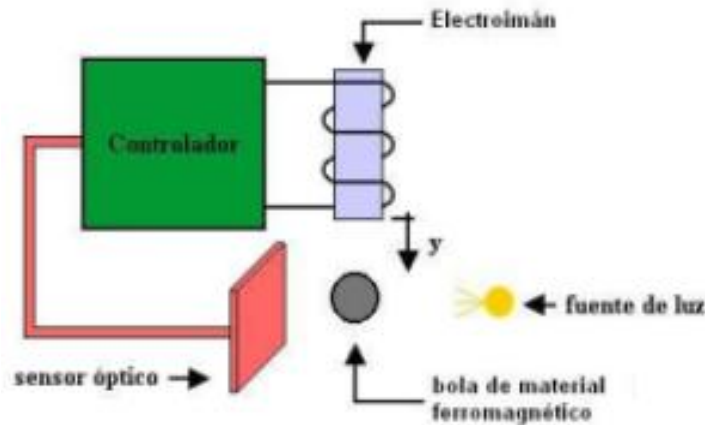


Figura 1.8. Diagrama esquemático del sistema de levitación magnética.

Es necesario obtener el modelo matemático que describa el comportamiento del sistema de levitación. En la Figura 1.9 a) se muestra el esquema de levitación magnética, en el que una bola de metal se suspende mediante una fuerza producida por el campo magnético del electroimán, por el cual fluye una corriente controlada por realimentación a través de una medición óptica de la posición de la bola. El circuito que representa el sistema se muestra en la Figura 1.9 b), (Arjón & Mandujano, 2007).

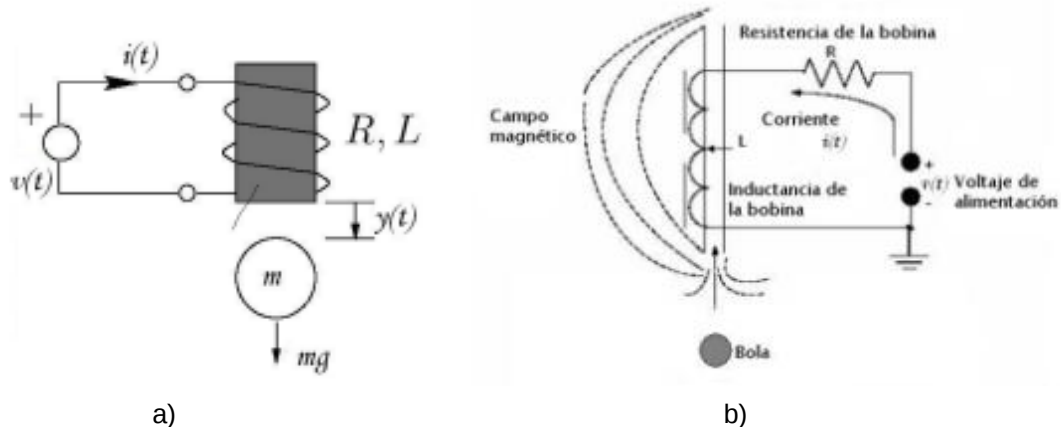


Figura 1.9. Sistema de levitación magnética. a) Esquema eléctrico. b) Circuito eléctrico.

Donde  $y(t)$  es la distancia entre el electroimán y la bola,  $v(t)$  es el voltaje de alimentación del electroimán,  $i(t)$  es la corriente que circula por el electroimán,  $R$  es la resistencia del electroimán,  $L$  es la inductancia del electroimán,  $m$  es la masa de la bola y  $g$  es la aceleración gravitacional.

El modelo matemático está basado en la ecuación del segundo principio de Newton. Utilizando el principio fundamental de dinámica, donde  $F(t)$  es la fuerza magnética del control en la ecuación del movimiento de la bola y está dada por:

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = mg - F(t) \quad (1.19)$$

Resolviendo la malla del circuito se obtiene la siguiente ecuación:

$$v(t) = R(t)i + L \frac{di(t)}{dt} \quad (1.20)$$

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

El electroimán de la OTNSC trabaja con corriente directa proveniente de una fuente estabilizada, 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 1.10.

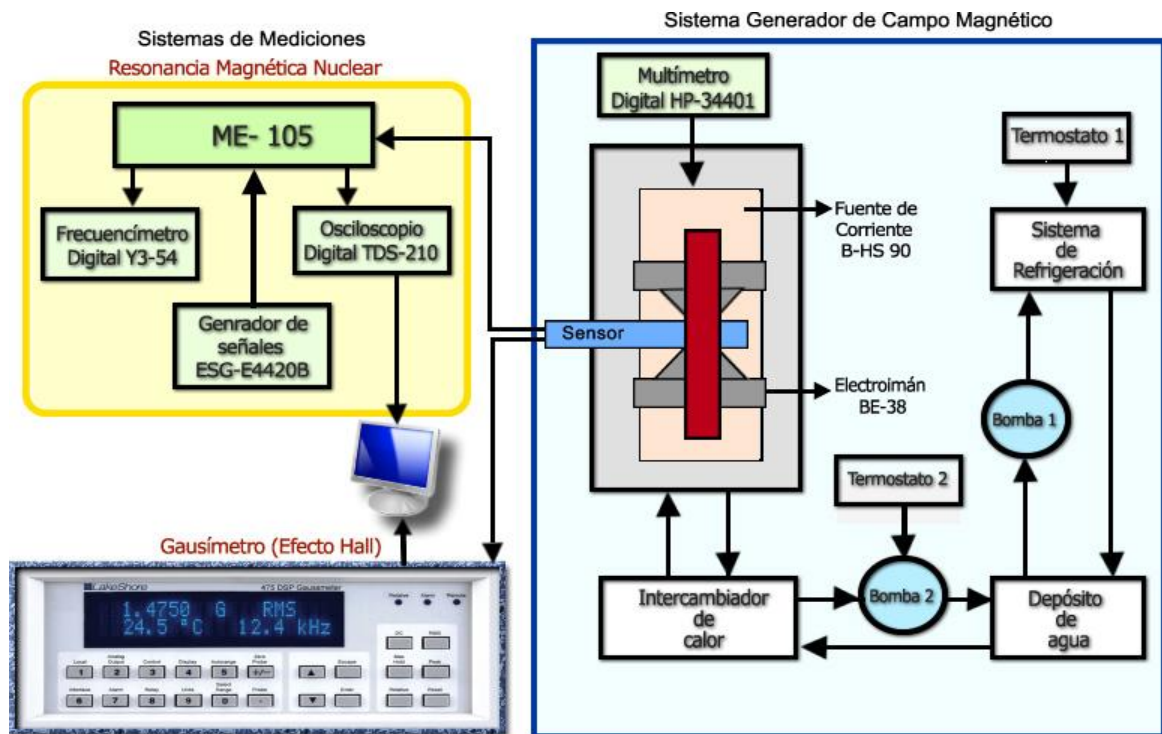


Figura 1.10. Esquema en bloques del Sistema Magnético.

En la OTNSC existe un laboratorio de mediciones magnéticas (sistema que se investiga). Este emplea 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.

## 1. Sistema de medición de campo magnético mediante el principio físico de RMNP.

El sistema magnético de la OTNSC, puede utilizar para hacer las mediciones de campo magnético, el principio físico de la RMNP, que consta de un Magnetómetro ME-105, que posee las siguientes partes, Figura 1.11 (Lara, 2015):



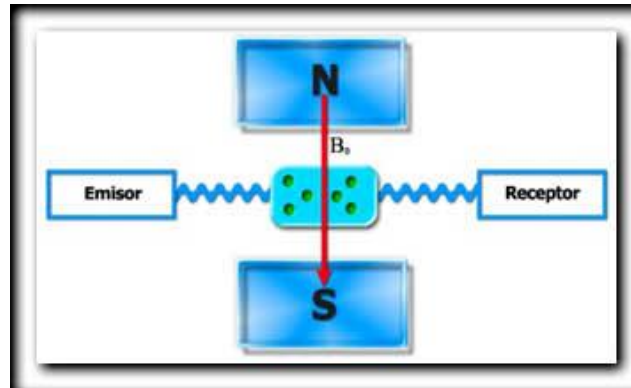
**Figura 1.11.** Módulo ME-105.

1. Programador de la serie de pulsos.
2. Modulador de pulsos y amplificador de potencia de Radio-Frecuencia (RF).
3. Amplificador receptor de alta sensibilidad y gran ancho de banda de RF.
4. Detector sincrónico y amplificador de señales de referencia de detección.
5. Filtro de Baja Frecuencia (BF), activo, con frecuencia de corte variable.
6. Amplificador de BF de ganancia variable y corrección de nivel de Offset.
7. Fuente de alimentación con filtro de línea de entrada contra ruidos de la red.

El fenómeno de la Resonancia Magnética Nuclear (RMNP) tuvo su origen en 1946, de forma simultánea e independiente los profesores Purcell y Bloch en los laboratorios de Física de la Universidades de Harvard y Stanford respectivamente, obtuvieron los primeros resultados y elaboraron la teoría como aplicación en instrumentos de análisis bioquímicos, por su gran sensibilidad a las variaciones en las estructuras (Martínez, 1997), (López, 2009).

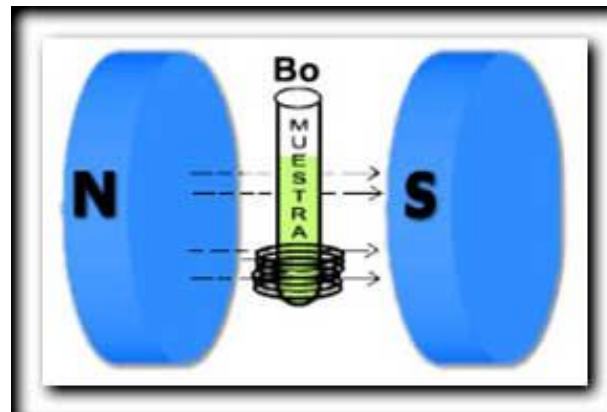
La RMN se basa en campos magnéticos intensos, ciertos núcleos atómicos pueden absorber energías de radiofrecuencia y generar a su vez una señal de radiofrecuencia capaz de ser captada por una antena receptora, permitiendo el estudio de las transiciones entre los niveles energéticos.

En la Figura 1.12 se muestra como está compuesto de forma general un equipo de RMN, el cual posee un imán, un emisor de radiofrecuencia (rf), la muestra y un receptor de rf. La RMN se sustenta en la relación entre la frecuencia de precesión de los núcleos y el campo magnético aplicado.



**Figura 1.12.** Partes principales de la tecnología de RMN.

Cuando una muestra que contiene isótopos, dotados de ciertas propiedades magnéticas, es colocada dentro de una bobina emisora entre los polos de un imán o electroimán, como se muestra en la Figura 1.13, con una homogeneidad en el orden de  $10^{-6}$  y es sometida a un campo magnético de radiofrecuencia del emisor, es capaz de absorber dicha energía de radiofrecuencia a una determinada frecuencia, propia de cada isótopo, conocida como frecuencia de Larmor (Burdelay, 2014), (Martínez, 1997), (López, 2009).



**Figura 1.13.** Muestra sometida a un Campo Magnético.

El método de RMN de pulsos, utiliza estallidos cortos e intensos de radiación de RF, permitiendo disminuir drásticamente el tiempo que requiere adquirir una acumulación del espectro completo de RMN y como consecuencia favorece a la disminución de las incertidumbres de las mediciones.

La utilización más frecuente del método de RMN, ha tenido como objetivo, realizar estudios de las características magnéticas de las sustancias (ensayos de espectroscopía), siendo necesaria la existencia de un campo magnético externo conocido. Para el caso de la medición de la unidad de medida (magnetometría) se parte del principio inverso, es decir, a partir de una muestra de núcleo conocido, el objetivo es la estimación del campo magnético externo al que se encuentra sometido, en ambos casos (espectroscopía y magnetometría), el modelo matemático cuyo principio físico se basa en un fenómeno cuántico, permite obtener una gran exactitud en la mediciones y ensayos. El

modelo matemático utilizado en los equipos de RMN, con muestras idealmente homogéneas, parte de la ecuación de Larmor.

$$W_0 = \gamma \cdot B_0 \quad (1.21)$$

$\gamma$ : razón giromagnética del isótopo sometido al campo.

$B_0$ : Inducción magnética del campo magnético externo idealmente homogéneo en el volumen de la muestra.

$W_0$ : frecuencia angular de precesión de los espines nucleares de la muestra homogénea en el campo magnético externo homogéneo.

El principio físico de la RMN se utiliza en el laboratorio de mediciones magnéticas de la OTN, para ello utiliza un sensor de RMN de pulsos, el cual está constituido por una instrumentación, donde posee un electroimán, una fuente de corriente para generar el campo magnético, un programador de pulsos para generar la radio frecuencia necesaria en una serie de pulsos para golpear la muestra, un canal de adquisición de los datos, un amplificador, el osciloscopio entre otros.

Entre las principales ventajas se destaca que la técnica de RMN es muy efectiva para explorar átomos individuales dentro de las moléculas. El método de RMN no solo permite conocer características importantes, como la densidad de flujo magnético, sino otras como la inhomogeneidad, gradiente y estabilidad del campo magnético en estudio. Posee una exactitud del orden de  $10^{-6}$ . Este método tiene las desventajas de que su implementación es costosa y de elevada rigurosidad.

## 2. Sistema de medición de campo magnético mediante el principio físico de Efecto Hall.

En la OTNSC se utiliza un dispositivo llamado gaussímetro de Efecto Hall para la medición de campo magnético. El Gaussímetro Modelo 475 DSP representado en la Figura 1.14 es el existente en el laboratorio, tiene una técnica de procesamiento digital de señales la cual está basada en el Efecto Hall, mide con una resolución de corriente directa (CD) de  $20 \mu\text{G}$ , básicamente posee una precisión de  $\pm 0.05\%$ , además posee un rango de frecuencia de  $50 \text{ kHz}$ , tiene un ancho de pulso por encima de  $20 \mu\text{s}$  de pico máximo (Maloof, 2004).



Figura 1.14. gaussímetro modelo 475 DSP.

El principio físico del Efecto Hall fue descubierto por el físico estadounidense Edwin Herbert Hall en el año 1879. El científico observó, que al aplicar un campo magnético (**B**) perpendicularmente a un conductor que transporta una corriente eléctrica (**I**), se observa una diferencia de potencial (**V<sub>Hall</sub>**) entre los puntos en los lados opuestos de ese conductor puntos que, en ausencia de campo tendrían el mismo potencial, Figura 1.15. La relación entre la inducción magnética (**B**) aplicada y la diferencia de potencial (**V<sub>Hall</sub>**) observada es dada por la siguiente ecuación siguiente:

$$V_{Hall} = bE = R_H bIB \quad (1.22)$$

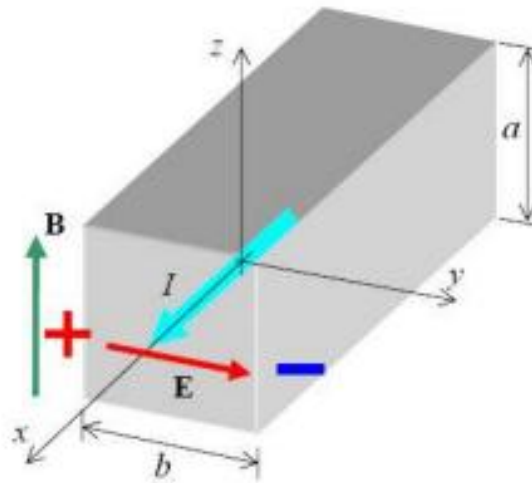


Figura 1.15. Ilustración del Efecto Hall.

Donde **V<sub>Hall</sub>** es la diferencia de potencial debido al Efecto Hall, **b** es la dimensión transversal del conductor, **E** es el campo eléctrico asociado a **V<sub>Hall</sub>**, **R<sub>H</sub>** es el coeficiente de Hall, **B** es la inducción magnética.

Si la corriente eléctrica (**I**) es mantenida constante, la diferencia de potencial (**V<sub>Hall</sub>**) será una función lineal de la inducción magnética (**B**), y midiendo la tensión de Hall es posible determinar el campo magnético aplicado.

Para realizar las mediciones utilizando el principio físico del Efecto Hall, se utiliza uno de los dispositivos sensores de estado sólido magnéticos más comunes, sensores de Efecto Hall. La tensión producida por el elemento sensor es muy pequeña (en la región de los milivoltios).

Los sensores Hall son fabricados a partir de pequeñas y delgadas hojas de material semiconductor con una baja densidad de cargas portadoras, de manera que se pueda conseguir una alta velocidad de electrones. La tensión de salida del sensor es proporcional al producto de la

corriente y de la fuerza del campo magnético. Como el valor de la corriente es conocido, la fuerza del campo magnético puede ser determinada con el valor de la tensión.

Este método con el que se pueden lograr precisiones de hasta  $2 \cdot 10^{-3}$  G (gauss), es usado en la mayoría de los equipos que se emplean en la medición de campo magnético por su fácil implementación, su resolución puede ser de 100 nT y la información se obtiene rápidamente. Otra de sus ventajas es que son equipos manuales, teniendo una dimensión típica de  $12 \times 3 \times 0.5$  cm. La principal desventaja que se puede señalar a este método es que presenta una dependencia no lineal entre el voltaje Hall, el campo magnético y la temperatura.

### **1.3. Identificación dinámica y sus antecedentes**

---

La identificación es una de las metodologías utilizadas en la modelación matemática de plantas o procesos, consiste en la determinación de un modelo matemático, que reproduzca con suficiente exactitud, para los fines deseados de Control Automático, las características dinámicas del proceso, a partir del conocimiento previo sobre éste y de los datos medidos (Arafet, 2004).

El término identificación de sistemas fue acuñado por Lofti Zadeh en 1962, como: **Identificación es la determinación, en base a la entrada y la salida, de un sistema, dentro de una clase de sistemas especificada, al cual el sistema probado es equivalente** (Zadeh, 1962).

En el área del control automático, la identificación de sistemas quedó establecida a mediados de los sesenta: en el tercer congreso de la IFAC en Londres, 1966, donde fue presentado un artículo de visión general sobre identificación de sistemas (Eykhoff *et al.* 1966). Un año después fue organizado en Praga el primer Symposium IFAC sobre identificación de sistemas (Zadeh, 1962). Por otro lado, se han escrito una serie de libros sobre la teoría que sustenta la identificación de sistemas, por ejemplo, Ljung (Ljung, 1987) y Söderstrom y Stoica (Söderström, 1989). No obstante, la teoría estadística para la estimación de parámetros tiene sus raíces en los trabajos de Gauss (1809) y Fisher (1902), gran parte de la teoría de procesos estocásticos estacionarios fue desarrollada durante el período comprendido entre 1920 y 1970.

Pero no fue hasta la publicación de dos importantes artículos “Effective construction of linear state-variable models from input-output functions” por Kalman (Kalman, 1965) y “Numerical Identification of linear dynamics systems from normal operating records”, escrito por Aström y Bohlin en el año 1965 (Aström, 1965), que se considera la fecha de nacimiento de la teoría de la identificación dentro de la comunidad del control. Ambos artículos sentaron las bases para el desarrollo de dos técnicas de identificación, las cuales dominan el campo en la actualidad: identificación en el espacio de estado e identificación mediante la predicción del error. La primera está basada en técnicas de proyección dentro del espacio Euclidiano, y la segunda está basada en el criterio de minimización del error (la cual es el punto de partida de la identificación paramétrica).

Existe el programa MATLAB que consta de una herramienta especializada para la identificación de sistemas que incluye la mayoría de los métodos para realizarla y una interfaz gráfica, que mediante funciones permiten al usuario desarrollar el proceso completo de identificación. El software profesional MATLAB posee un Toolbox para la identificación de sistemas, el cual constituye una herramienta para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos, a partir de un conjunto de datos de entrada/salida. La identificación con el MATLAB se puede realizar de varias formas, una de ellas es a través de la interfaz gráfica (ident) la cual facilita construir los modelos. Otra forma es mediante la creación de programas de identificación a partir de ficheros con extensión “.m”.

### 1.3.1. Modelo de un sistema dinámico

---

Los modelos matemáticos son la descripción matemática de las características dinámicas de un sistema. El primer paso en el análisis de un sistema dinámico es elaborar su modelo (Ogata, 1980). Hay que tener siempre presente que desarrollar un modelo matemático es la parte más importante de todo el análisis.

Los modelos pueden tomar muchas formas distintas. Según el sistema particular que se trate y las circunstancias, por lo que una representación matemática puede ser más adecuada que otras representaciones.

Cuando se realizan observaciones de variables de entradas y salidas de un sistema, es posible llegar a conclusiones sobre el grado de relación existente entre ellas, las cuales son las bases del modelado. La complejidad del modelo queda sujeta al uso del mismo, por tanto, un modelo puede ser entendido como una herramienta matemática que permite expresar el comportamiento de un sistema real, sin necesidad de experimentar directamente sobre él (Arafet, 2004), (Ramírez, 2014).

🔗 **Los modelos de sistemas físicos pueden ser de muy diversos tipos. Ljung brinda una posible clasificación, en función del grado de formalismo matemático que poseen** (Arafet, 2004), (Ramírez, 2014):

1. **Modelos mentales, intuitivos o verbales:** estos modelos carecen de formalismo matemático. Por ejemplo, para andar en una bicicleta es necesario conocer que girar el manubrio a la derecha hace que la misma gire a la derecha también. Esto está almacenado en el cerebro que hace actuar sobre los brazos, constituyendo un modelo mental
2. **Modelos no paramétricos:** muchos sistemas quedan perfectamente caracterizados mediante gráficos, diagramas o tablas que describen las propiedades dinámicas mediante un número no finito de parámetros. Por ejemplo, un sistema lineal puede ser representado mediante su respuesta al impulso o al escalón, o bien mediante su respuesta en frecuencia.
3. **Modelos paramétricos o matemáticos:** para aplicaciones más avanzadas, puede ser necesario utilizar modelos que describan las relaciones entre las variables del sistema mediante expresiones matemáticas. Por ejemplo, ecuaciones diferenciales en sistemas continuos y ecuaciones de diferencias en sistemas discretos.

❏ **Dependiendo de la aplicación pueden ser:**

1. Métodos de identificación off-line (a posteriori), utilizados en aquellas aplicaciones en que no se requiera un ajuste continuado del modelo. En estos casos, se realiza la identificación previa de la planta, considerándose que la validez de los parámetros obtenidos no se verá alterada con el paso del tiempo.
2. Métodos de identificación on-line (identificación recursiva), en los que los parámetros se van actualizando continuamente a partir de los nuevos datos de entrada-salida obtenidos durante la evolución del proceso. Estos métodos son muy utilizados en sistemas de control adaptativo.

❏ **Dependiendo del criterio de ajuste de los parámetros:**

Existen diversos métodos matemáticos para ajustar los parámetros de una estructura a un conjunto de datos de entrada-salida. Algunos de los más utilizados en el campo de la identificación son el método de mínimos cuadrados y el método de las variables instrumentales.

❏ **La utilización de una metodología u otra para la construcción de modelos responde a las necesidades concretas, siempre teniendo en cuenta que:**

1. Un modelo se desarrolla siempre a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis y, por lo tanto, es una representación parcial de la realidad.
2. Un modelo se construye para una finalidad específica y debe ser formulado para que sea útil a dicho fin.
3. Un modelo tiene que ser por necesidad un compromiso entre la simplicidad y la necesidad de recoger los aspectos esenciales del sistema en estudio.

❏ **Partiendo de estas premisas, existen dos enfoques diferentes para la obtención de modelos, estos son** (Arafet, 2004), (Ramírez, 2014):

1. Por la vía analítica consiste en desarrollar un modelo a partir del conocimiento de las relaciones físico-químicas que describen el comportamiento del proceso a identificar, planteando ecuaciones de balance de masa, energía, u otras. Es importante considerar la complejidad que este método presenta a la hora de considerar todas las leyes físicas que intervienen en un proceso. Esta técnica de identificación obvia las tolerancias de los elementos, desgastes, fuentes de ruido no consideradas, entre otras, que hacen que el comportamiento real nunca sea el previsto. El modelado por vía analítica tiene un campo de aplicación restringido a procesos específicos, o a aplicaciones en la que se requiere gran exactitud en el modelo obtenido. En muchos casos, la estructura del modelo obtenido a partir del conocimiento físico de la planta posee un conjunto de parámetros desconocidos y que sólo se pueden determinar experimentando sobre el sistema real. De ahí la necesidad de recurrir a los métodos de identificación por vía experimental.
2. Por la vía experimental se considera el sistema como caja negra, con determinadas entradas y salidas. En esta situación se realiza un conjunto de experimentos que proporcionarían pares de datos medidos de las entradas y salidas durante la evolución del sistema hacia el estado estacionario, a partir de los cuales se trata de determinar el modelo del sistema.

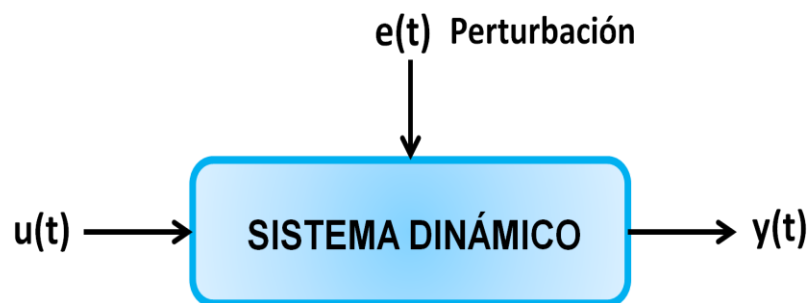
Los modelos obtenidos mediante técnicas de identificación tienen, sin embargo, las siguientes desventajas:

1. Su rango de validez suele ser limitado (sólo son aplicables a un determinado punto de trabajo, un determinado tipo de entrada o un proceso concreto).
2. En muchos casos es difícil dar significado físico al modelo obtenido, puesto que los parámetros identificados no tienen relación directa con ninguna magnitud física. Estos parámetros se utilizan sólo para dar una descripción aceptable del comportamiento conjunto del sistema.

El modelo de un sistema, como representación de sus aspectos fundamentales en la forma más conveniente para la finalidad a que está destinado, puede quedar expresado en forma de un conjunto de ecuaciones, tablas, gráficos o incluso de reglas que describen su operación. Respecto al orden del modelo existen dos alternativas: imponer el orden o dejarlo libre a determinar.

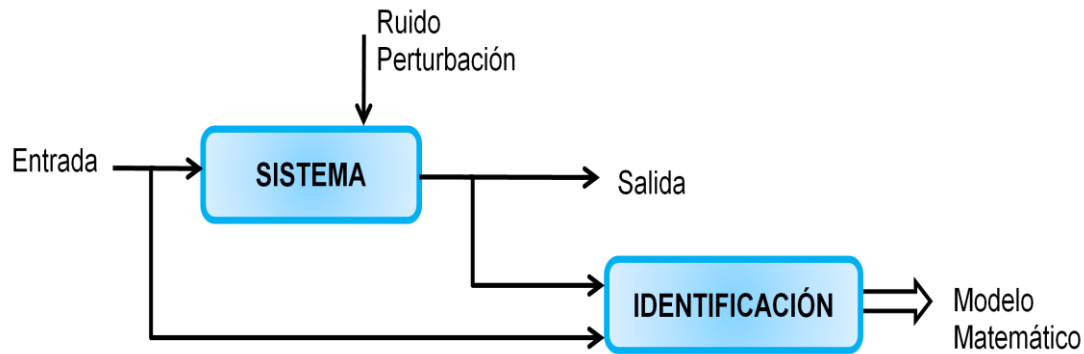
### 1.3.2. Identificación de sistemas

Un sistema es toda realidad en la que interactúan variables de diferentes tipos para producir señales observables. Las señales observables que son de interés para el observador se denominan salidas del sistema, mientras que las señales que pueden ser manipuladas libremente por dicho observador son las entradas del mismo. El resto de señales que influyen en la evolución de las salidas pero no pueden ser manipuladas por el observador se denominan perturbaciones, se observa en la Figura 1.16 (Arafet, 2004), (Ramírez, 2014).



**Figura 1.16.** Sistema dinámico con entrada  $u(t)$ , perturbación  $e(t)$  y salida  $y(t)$ .

La identificación de sistemas podría entenderse como las técnicas para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de mediciones realizadas de entradas o variables de control, salidas o variables controladas y perturbaciones, que se representa en la Figura 1.17.



**Figura 1.17.** Proceso de obtención de un modelo mediante la identificación.

La identificación puede realizarse en función de la estructura del modelo, y del comportamiento físico o no del sistema. En este sentido se pueden distinguir tres tipos (Arafet, 2004), (Ramírez, 2014):

1. **Caja negra:** los parámetros del modelo no tienen una interpretación física. Un modelo basado en leyes fundamentales es muy complicado o se desconoce.
2. **Caja gris:** algunas partes del sistema son modeladas basándose en principios fundamentales, y otras como una caja negra. Algunos de los parámetros del modelo pueden tener una interpretación física; a este tipo de modelos también se les conoce como “Tailor-made”, estimando sólo los parámetros no conocidos.
3. **Caja blanca:** la estructura del modelo se obtiene a partir de leyes fundamentales. Los parámetros tienen una interpretación física.

#### **Pasos para abordar el proceso de identificación** (Ramírez, 2014):

En términos generales, el proceso de identificación comprende los siguientes pasos:

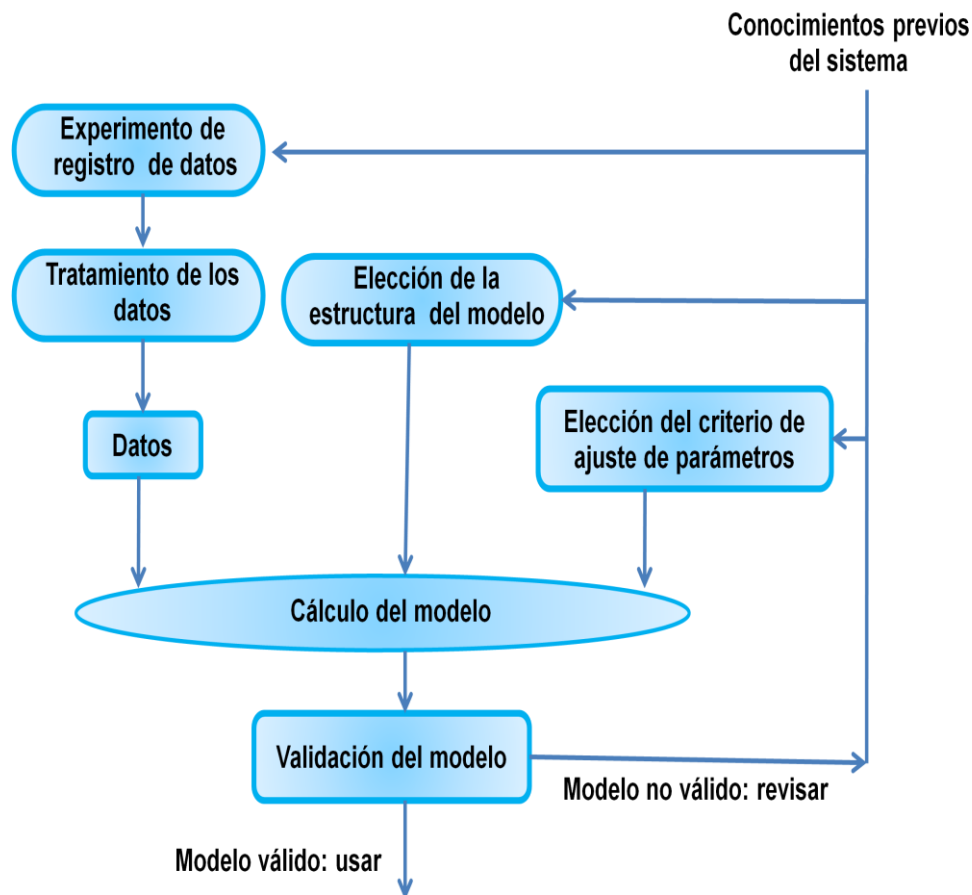
1. **Obtención de datos de entrada – salida:** para ello se debe excitar el sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.
2. **Filtrado de datos:** los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones, que pueden ser corregidas antes de iniciar la identificación del modelo, por lo que se procede a preparar los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.
3. **Elección de la estructura del modelo:** si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer paso es determinar la estructura deseada. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.

4. **Obtención de los parámetros del modelo:** se procede a la estimación de los parámetros, de la estructura que mejor ajusta la respuesta del modelo, a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.

5. **Validación y refinación del modelo:** determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en cuestión. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:

- a) El conjunto de datos de entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
- b) La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
- c) El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

Dependiendo de la causa estimada, deberá repetirse el proceso de identificación desde el paso correspondiente, como se muestra en la Figura 1.18.



**Figura 1.18.** Esquema del proceso de identificación.

### 1.3.3. Técnicas de identificación paramétrica y tipos de modelos paramétricos

Los modelos paramétricos, a diferencia de los anteriores, quedan descritos mediante una estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales de interés del sistema (entradas, salidas y perturbaciones). En muchas ocasiones es necesario realizar la identificación de un sistema del cual no se tiene ningún tipo de conocimiento previo. En estos casos, se suele recurrir a modelos estándar, cuya validez para un amplio rango de sistemas dinámicos ha sido comprobada experimentalmente. Generalmente estos modelos permiten describir el comportamiento de cualquier sistema lineal. La dificultad radica en la elección del tipo de modelo (orden del mismo, número de parámetros, entre otros) que se ajuste satisfactoriamente a los datos de entrada - salida obtenidos experimentalmente.

Generalmente los modelos paramétricos se describen en el dominio discreto, puesto que los datos que sirven de base para la identificación se obtienen por muestreo. En el caso de que se requiera un modelo continuo, siempre es posible realizar una transformación del dominio discreto al continuo. La expresión más general de un modelo discreto es del tipo:

$$s(t) = n(t) + w(t) \quad (1.23)$$

Donde  $w(t)$  es el término que modela la salida debida a las perturbaciones,  $n(t)$  la salida debida a la entrada, y  $s(t)$  la salida medible del sistema. Cada uno de estos términos puede desarrollarse de la siguiente forma:

$$n(t) = G(q^{-1}, \theta) \cdot u(t) \quad (1.24)$$

$$w(t) = H(q^{-1}, \theta) \cdot e(t) \quad (1.25)$$

$$s(t) = A(q^{-1}, \theta) \cdot y(t) \quad (1.26)$$

Donde  $q^{-1}$  es el operador retardo,  $\theta$  representa un vector de parámetros,  $u(t)$  y  $e(t)$  son la entrada al sistema y el ruido de entrada al mismo respectivamente y  $y(t)$  es la salida de interés del sistema (que puede no coincidir con la salida medible). Tanto  $G(q^{-1}, \theta)$  como  $H(q^{-1}, \theta)$  son los cocientes de polinomios del tipo:

$$G(q^{-1}, \theta) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} = \frac{b_1 \cdot q^{-nk} + b_2 \cdot q^{-nk-1} + \dots + b_{nb} \cdot q^{-nk-nb+1}}{1 + f_1 \cdot q^{-1} + \dots + f_{nf} \cdot q^{-nf}} \quad (1.27)$$

$$H(q^{-1}, \theta) = \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} = \frac{1 + c_1 \cdot q^{-1} + \dots + c_{nc} \cdot q^{-nc}}{1 + d_1 \cdot q^{-1} + \dots + d_{nd} \cdot q^{-nd}} \quad (1.28)$$

Entonces  $A(q^{-1}, \theta)$  es un polinomio del tipo:

$$A(q^{-1}, \theta) = 1 + a_1 \cdot q^{-1} + \dots + a_{na} \cdot q^{-na} \quad (1.29)$$

El vector de parámetros  $\theta$  contiene los coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$  y  $f_i$  de las funciones de transferencia anteriores. La estructura genérica de estos modelos es por tanto:

$$A(q^{-1}) \cdot y(t) = G(q^{-1}, \theta) \cdot u(t) + H(q^{-1}, \theta) \cdot e(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} e(t) \quad (1.30)$$

Para elegir la *estructura* del tipo de modelos considerados hay que determinar el orden de cada uno de los polinomios anteriores, es decir **na**, **nb**, **nc**, **nd**, **nf** y el retardo entre la entrada y la salida **nk**. Una vez elegidos estos valores, sólo queda determinar el vector de coeficientes (**a<sub>i</sub>**, **b<sub>i</sub>**, **c<sub>i</sub>**, **d<sub>i</sub>** y **f<sub>i</sub>**) que hacen que el modelo se ajuste a los datos de entrada-salida del sistema real.

La anulación de alguno de los polinomios, resultando estructuras simplificadas, facilita el proceso de ajuste de parámetros. Cada una de las estructuras (ARX, ARMAX, OE o BJ) tiene sus propias características y debe ser elegida fundamentalmente en función del punto en el que se prevé que se añade el ruido en el sistema. En cualquier caso, puede ser necesario ensayar con varias estructuras y con varios órdenes dentro de una misma estructura hasta encontrar un modelo satisfactorio.

En muchos casos, alguno de los polinomios anteriores no se incluye en la descripción del modelo, dando lugar a los siguientes casos particulares, entre otros:

**Tabla 1.1.** Diferentes estructuras de modelos paramétricos.

| Tipo de modelo      | Condición                               | Estructura resultante                                                                    |
|---------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Modelo ARX</b>   | $F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = C(q^{-1}) = 1$ | $A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + e(t)$                                            |
| <b>Modelo OE</b>    | $C(q^{-1}) = D(q^{-1}) = A(q^{-1}) = 1$ | $y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + e(t)$                                   |
| <b>Modelo ARMAX</b> | $F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = 1$             | $A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + C(q^{-1}) \cdot e(t)$                            |
| <b>Modelo BJ</b>    | $A(q^{-1}) = 1$                         | $y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \cdot e(t)$ |

#### 1.3.4. Métodos para el ajuste de parámetros

Una vez elegida la estructura del modelo (tanto el tipo – ARX (Auto-Regressive eXogen), ARMAX (Auto-Regressive Moving Average eXogen), BJ (Box – Jenkins), OE (Output – Error)...- como los órdenes de cada polinomio), es necesario determinar el valor de los parámetros del mismo que ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida experimentales. Es importante destacar, sin embargo, que esta etapa del proceso de identificación se ve facilitada por la existencia de programas como herramientas que proporcionan diferentes algoritmos para el ajuste de parámetros. Una de estas herramientas es el programa MATLAB.

Existen varios métodos o criterios para realizar este ajuste de parámetros entre ellos se puede mencionar:

## 1. Errores de predicción o residuos de un modelo.

Todo modelo dinámico es capaz de predecir el valor de la salida del sistema en función de las entradas y salidas en instantes anteriores. Se llama error de predicción  $\varepsilon(t, \theta)$  a la diferencia entre la salida estimada por el modelo y la salida real del sistema en un determinado instante de tiempo:

$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - y_e(t, \theta) \quad (1.31)$$

Donde:  $y_e(t, \theta)$  es la salida estimada por el modelo en el instante  $t$ .

## 2. Regresión lineal.

Se dice que una estructura posee regresión lineal cuando la salida estimada puede expresarse como:

$$y_e(t, \theta) = \varphi^T(t) \cdot \theta + \varepsilon(t) \quad (1.32)$$

Donde  $\varphi^T(t)$  es un vector columna formado por las salidas y entradas anteriores (conocido como vector de regresión), y  $\theta$  es el vector de parámetros del modelo.

El modelo ARX es un claro ejemplo de estructura con regresión lineal, definiendo:

$$\theta = [a_1 a_2 \dots a_{na} b_1 \dots b_{nb}]^T \quad (1.33)$$

$$\varphi^T(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-na) u(t-nk) \dots u(t-nk-nb+1)] \quad (1.34)$$

## 3. Método de mínimos cuadrados.

El método de los mínimos cuadrados indica que los parámetros de un modelo se deben elegir de tal forma que, la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de la salida observada (reales) y los estimados, multiplicada por factores que midan el grado de precisión alcance un mínimo.

Considerando un modelo genérico:

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} * z^{-d} \quad (1.35)$$

La identificación del mismo se realiza mediante la estimación de los parámetros desconocidos  $[a_0, a_1, \dots, a_{1n}, b_0, b_1, \dots, b_m]$ . Para ello se procede como se expone: dados los  $k+1$  valores de la entrada y los  $k$  de la salida, la siguiente salida estimada será:

$$\hat{y} = (k + 1) \quad (1.36)$$

$$\hat{y} = (k + 1) = x_{k+1}^t \theta \quad (1.37)$$

$$\theta = [a_0, a_1, \dots, a_{1n}, b_0, b_1, \dots, b_m]$$

$$x_{k+1} = [-y(k), -y(k-1), \dots, -y(k-n+1), u(k+1-d), u(k-d), \dots, u(k-m+1-d)] \quad (1.38)$$

La discrepancia entre la salida real y la estimada viene dada por la siguiente expresión de error:

$$e(k + 1) = y(k + 1) - \hat{y}(k + 1) \quad (1.39)$$

Repitiendo este planteamiento para N medidas sucesivas, las salidas correspondientes a esos N instantes se pueden expresar mediante la ecuación matricial siguiente:

$$\begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y(k) & -y(k-1) & u(k+1-d) & u(k-d) \\ -y(k+1) & -y(k) & u(k+2-d) & u(k+1-d) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -y(k+N-1) & -y(k+N-2) & u(k+N-d) & u(k+N-1-d) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

Dicha ecuación  $Y = X\theta$  presenta infinitas soluciones. De todas ellas, se tomará, utilizando el método de Mínimos Cuadrados, aquella que minimice el error.

#### 4. Criterios para la selección del orden de los parámetros.

El propósito de la selección del orden o la estructura es encontrar el modelo que ofrezca mayor eficiencia para su uso (ejemplo en el control). Existen algunos métodos para la selección del orden que no necesitan la completa estimación de los parámetros del modelo. Estos incluyen el chequeo del rango de las matrices de covarianza, graficar el valor singular de la matriz de Hankel (Zhu, 2001). En general estos métodos no son eficientes para datos con baja relación señal-ruido (ruido > señal), por lo que es recomendable estimar modelos mediante el incremento gradual del orden de los parámetros, y luego escoger el mejor orden usando un criterio de error.

Si se usan solo los datos de estimación para el criterio de error, este generalmente decrecerá monótonamente a medida que aumente el orden, incluso cuando el orden sobrepase el mejor valor, ya que mientras mayor sea el orden del modelo, este tendrá más libertad para adecuarse a los datos de estimación dados. Este es el llamado problema de sobre ajuste.

Existen un gran número de criterios que usan los datos de estimación para la selección del orden. En la literatura sobre identificación, se usa a menudo el criterio de predicción del error tanto para la selección del orden del modelo, como para la validación del mismo. Se denota el criterio de predicción del error usando datos de validación como (Zhu, 2001):

$$V_{PE}^V = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \hat{H}^{-1}(q) [y^v(t) - \hat{G}(q)u^v(t)]^2 \quad (1.41)$$

Donde  $u^v(t)$  y  $y^v(t)$  son respectivamente la entrada y salida del conjunto de datos de validación.

A continuación se muestra el criterio de predicción del error usando el conjunto de datos de estimación como:

$$V_{PE}^E = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \hat{H}^{-1}(q) [y(t) - \hat{G}(q)u(t)]^2 \quad (1.42)$$

Considerando que el ruido blanco  $e(t)$  es Gaussiano y el orden del modelo es correcto, se define como el **Criterio del Error de Predicción Final de Akaike (FPE)**:

$$EV_{PE}^V = \frac{N + d}{N - d} V_{PE}^E \quad (1.43)$$

Donde  $N$  es el número de muestras de datos para estimación y  $d$  es el número de parámetros del modelo.

En el MATLAB, el criterio del error de predicción final de Akaike brinda una medida de la calidad del modelo, simulando la situación donde el modelo es probado en un juego de datos diferentes. Luego de procesar diferentes modelos, es posible compararlos usando este criterio. De acuerdo con la teoría de Akaike, el modelo más eficiente es el que tenga la menor **Criterio del Error de Predicción Final de Akaike (FPE)**.

Por otra parte, el **Criterio de Aproximación de Mínima distancia de Rissanen (MDL)**, selecciona la estructura que permita hacer la descripción general más pequeña a partir de los datos observados, o sea su principal objetivo es minimizar la complejidad del modelo, este se obtiene mediante la ecuación:

$$MDL = V_{PE}^E \left[ 1 + \frac{d \log(N)}{N} \right] \quad (1.44)$$

## Conclusiones Parciales I

---

1. En los electroimanes, la histéresis representa la energía magnética perdida por unidad de volumen de material por ciclo de magnetización y desmagnetización, se manifiesta como calor dentro del material elevando la temperatura, por lo que es conveniente utilizar materiales magnéticamente blandos en su construcción.
2. En el análisis de las leyes físicas se supone que el núcleo es homogéneo y está formado por un material cuya permeabilidad es mucho mayor que la del aire, lo que implica que no existe flujo de dispersión.
3. La identificación analítica obvia las tolerancias, desgastes, fuentes de ruido no consideradas, entre otras, que hacen que el comportamiento real nunca sea el previsto.
4. La identificación experimental tiene un rango de validez limitado, sólo son aplicables a un punto de operación, un tipo de entrada o un proceso concreto.
5. En la práctica, lo ideal es recurrir a una mezcla de ambos métodos para obtener el modelo final. El uso de datos reales para identificar los parámetros del modelo provee a éste de una gran exactitud, pero la identificación se facilita cuanto mayor sea el conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.
6. Las estructuras (ARX, ARMAX, OE o BJ) tienen sus características y se debe ensayar con varias estructuras y con varios órdenes dentro de una misma estructura hasta encontrar un modelo satisfactorio.



*" El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente  
un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento,  
porque precisamente es lo que más estamos sembrando,  
lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia".*

*Fidel Castro Ruz*

## *Capítulo 2*

## **CAPÍTULO II. MODELO DINÁMICO DEL ELECTROIMÁN**

---

### **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 sus componentes, específicamente de las partes del electroimán. Se realiza el estudio de los cabezales, y de las muestras que se emplean en las mediciones por el método de Resonancia Magnética Nuclear (RMN). Se presenta un análisis del lazo de histéresis, válido para estimar el material de fabricación del electroimán, y conocer el valor de la inductancia y la permeabilidad magnética relativa aparente, para un determinado punto de operación. Se busca el modelo matemático por la vía analítica que permite compararlo con el modelo por la vía experimental y se muestran los resultados de la identificación, partiendo de los datos para cada experimento, donde finalmente se propone el modelo de acuerdo a los mejores resultados que se obtienen.

### **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  $\pm 0.2$  °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  $1 \mu\text{m}$  (Anexo 2).

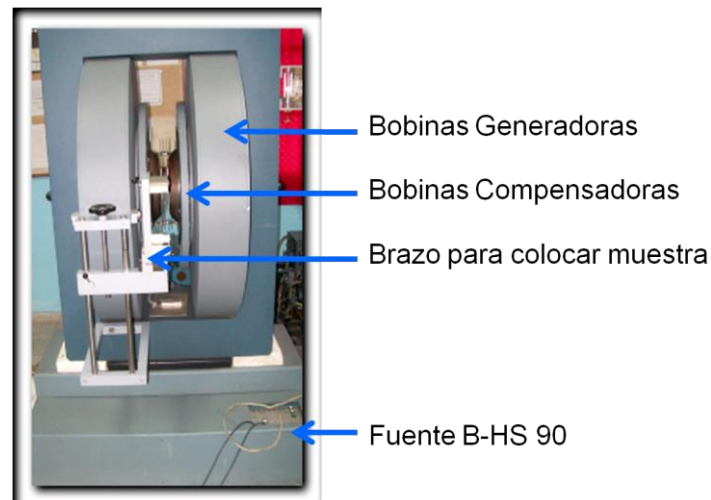


Figura 2.1. Partes del electroimán Bruker BE-38.

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 (Anexo 3).

#### 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 (Anexo 4).

(Gilart, 2015), (<http://fiuady-lab2.blogspot.com/2010/02/bobina-de-helmholtz.html>), [http://personal.us.es/boix/uploads/pdf/tecnicas\\_electrodinamica/helmholtz\\_prot.pdf](http://personal.us.es/boix/uploads/pdf/tecnicas_electrodinamica/helmholtz_prot.pdf)).

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, se muestran en los Anexos 5, 6, 7 y 8. 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                                               |
| <b>Eléctricos</b>                                |                                                   |
| Numero de vueltas                                | 2 x 400                                           |
| Resistencia fría                                 | 2 x aprox. 0.35 $\Omega$                          |
| Resistencia caliente                             | 2 x aprox. 0.45 $\Omega$                          |
| 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 <sup>2</sup> ) | 36                                                |
| Resistencia/100 m ( $\Omega$ )                   | 0.049                                             |
| Peso/100 m (kg)                                  | 32                                                |
| Excitación máxima $H_{\text{máx}}$               | 1154 kA/m ( $I_{\text{máx}} = 50$ A) $P < 2.5$ kW |

## 2. Fuente de alimentación estabilizada Bruker.

En el Anexo 9 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  $\Omega$  y un coeficiente térmico de  $TK=1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , 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.



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  $dH_o / dt$  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 (Anexo 10).

### 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  $\pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , sin que se vea afectado el campo magnético; experimentalmente se comprobó que las fluctuaciones pueden llegar hasta  $\pm 0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 2.2. Especificaciones para preparar las mediciones por el método de RMNP

La función del transductor es la de transmitir la perturbación, (originada en el módulo del magnetómetro ME-105), al campo magnético y enviar luego a este mismo la respuesta del campo a esta perturbación, específicamente es de interés la respuesta que envía en el momento que ocurre el fenómeno de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) con el núcleo que compone la muestra sensora, es decir cuando se capta la Señal de Inducción Libre (SIL).

**El transductor de RMNP está compuesto por:**

1. El brazo es la parte del transductor que sobresale del electroimán. En un extremo se le acopla el cabezal, el cual porta la muestra sensora, y en un costado la caja de sintonía (generaciones de radio frecuencia para un rango de 20 MHz a 100 MHz).

2. La caja de sintonía, donde cada caja de sintonía posee una impedancia distinta, y está diseñada y enmarcada para un cierto intervalo de frecuencias.
3. El cabezal es la pieza más compleja del transductor, en el se encuentra la bobina de excitación y otros circuitos que permiten realizar la estabilización de campo con Deuterio (rango que barre de 20 MHz a 100 MHz).
4. En la muestra sensora, se debe tener en cuenta que varía el volumen de la muestra a utilizar; esto es necesario para obtener una óptima relación del coeficiente de llenado, estando el volumen entre  $1\text{cm}^3$  y  $3\text{cm}^3$ .

El electroimán Bruker BE-38, para comenzar el proceso de mediciones por el método de RMNP, utiliza un dispositivo llamado brazo (Anexos 11 y Anexo 12), los cuales permiten seleccionar en dependencia del experimento la muestra a utilizar. Las mediciones para distintos isótopos aparecen en el Anexo 13. En el Anexo 14 se muestra para cada brazo el rango de frecuencias determinado con sus respectivos cabezales (<http://www.bruker.com/es/products/mr/nmr/magnets/magnets.html>).

Se realizaron varios estudios para determinar las características de los distintos cabezales y sus muestras, lo que permitió conocer la mejor combinación para un experimento determinado. Los resultados fueron los siguientes (para lograr los diferentes estudios y mediciones por el método de RMNP se siguieron los pasos que aparecen en el Anexo 15, Anexo 16 y Anexo 17):

1. La mejor sintonía se establece para la combinación # 11 entre 8 y 9.5 MHz.
2. En la medición con la combinación 11 con  $\text{H}^1$ , ya a 11.5 MHz, es muy difícil discernir la Señal de Inducción Libre (SIL) de resonancia en el dominio del tiempo, no así en el dominio de la frecuencia.
3. Las señales obtenidas de 11 MHz a 12 MHz son más estrechas en el dominio del tiempo, producto de la mala sintonización, pero se puede distinguir perfectamente la señal en el sensor.

### **2.3. Modelo a régimen estacionario del electroimán**

Las mediciones se realizan en un local limpio, sin vibraciones mecánicas perceptibles, y sustancias corrosivas, a una temperatura entre  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  y con una humedad relativa  $\leq 80\%$ . Los instrumentos patrones utilizados deben estar limpios, colocados de forma adecuada y correctamente aterrados cuando se proceda, posteriormente se siguen los pasos siguientes:

1. Encender el sistema de enfriamiento y esperar hasta que la temperatura en el intercambiador de calor secundario este en  $(20 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para encender la fuente del electroimán.
2. Tener encendidos todos los equipos electrónicos como mínimo el tiempo establecido por la documentación técnica a la temperatura indicada (por lo general 1 h), antes de encender la fuente del electroimán.

Se realizó un barrido de ajuste grueso de los valores de campo magnético en el electroimán Bruker, contra el voltaje en la resistencia shunt con valor de  $0.01 \Omega$ , utilizando el magnetómetro de Efecto Hall. Antes de encender el electroimán, se llevó el potenciómetro a cero, y se colocó el sensor de Efecto Hall dentro de las bobinas del cabezal Bruker, la punta del sensor se introduce 5 mm, fijándose la posición del sensor Hall en la posición de máximo campo medido (ángulo de  $90^\circ$  entre las líneas de inducción y el sensor); luego de transcurridos 20 minutos se efectúan las mediciones que se registran en la tabla del Anexo 18.

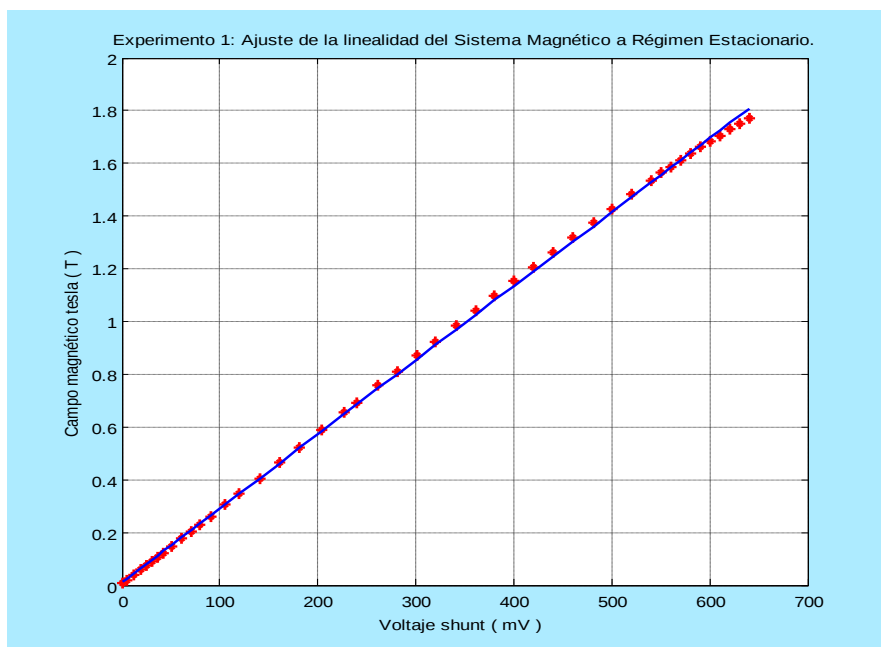
Cuando se realizan estas mediciones de voltaje contra campo, permiten obtener el valor de corriente que está circulando por el electroimán, para distintos valores de voltaje en la resistencia shunt utilizando la ley de Ohm, ya que la corriente eléctrica que genera el campo magnético se mide por medio de la tensión eléctrica aplicada sobre la misma (Anexo 18).

**Tabla 2.2.** Medición de voltaje contra campo por el Método de Efecto Hall para la estimación de la corriente.

| Voltaje   | Resistencia shunt | Corriente |
|-----------|-------------------|-----------|
| 639.96 mV | $0.01 \Omega$     | 64 A      |

En el programa que se hizo (nombre del programa hecho en MATLAB **ExperimentoHallyModelo2.m**) se analizaron todos los datos tomados del experimento realizado, (por el método del Efecto Hall). Inicialmente se seleccionaron todos los datos para hacer una valoración general del experimento, luego se dividieron los datos por tramos Anexo 18 y Anexo 19.

Como se observa en la Figura 2.3 la linealidad del sistema a régimen estacionario y su ajuste por el método de mínimos cuadrados, es decir se realiza el ajuste de los puntos a una línea recta.



**Figura 2.3.** Gráfica del modelo estático del electroimán con todos los datos del experimento.

Se grafican los niveles de voltaje (entrada) contra valores de campo (salida), de forma estática, para conocer la linealidad del electroimán, y estimar la mejor zona de trabajo. A partir de los 540 mV aproximadamente se tiene circulando en el electroimán (para ese punto de operación) una corriente de 54 A, donde se observa gráficamente que a partir de este punto el electroimán comienza la saturación magnética, además se analiza que la no linealidad de esta curva afecta el modelo porque influye en el error de predicción, por tanto se debe tener en cuenta que por debajo de este valor se debe aplicar el escalón de voltaje para hacer las mediciones dinámicas del sistema.

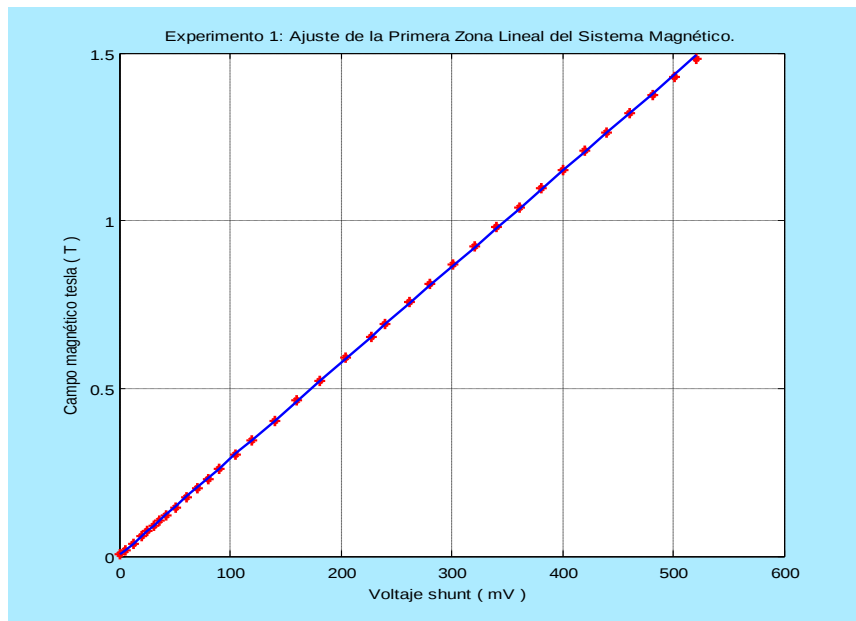
Para explicar el fenómeno de la saturación magnética se puede recurrir a la teoría molecular de los imanes: cuando se introduce en una bobina un núcleo que posee un material ferromagnético y se hace circular una corriente eléctrica por dicha bobina, aparece un campo magnético en su interior, de intensidad de campo (**H**), que orienta un cierto grado las moléculas magnéticas de dicha sustancia; lo que refuerza el campo con una inducción magnética (**B**). Un aumento de la intensidad de la corriente tiene como consecuencia un aumento de **H**; lo que hace orientarse un poco más las moléculas magnéticas reflejándose en un nuevo aumento de la inducción magnética. Si se continúa aumentando la intensidad de la corriente, y con ella **H**, llega un momento en que las moléculas magnéticas están ya totalmente orientadas, y por mucho que se aumente la intensidad del campo, éste ya no se ve reforzado. Se ha alcanzado la saturación magnética.

El polinomio siguiente se aleja de los puntos al inicio y final del intervalo, incrementando esto el error de predicción, quedando de la forma siguiente (Anexo 20):

$$y = 0.0028 * V + 0.0105 \quad (2.1)$$

- Los coeficientes del polinomio de mejor ajuste son  $a_1 = 0.0028$  y  $b_1 = 0.0105$ .
- Donde  $a_1$  y  $b_1$  son los coeficientes que describen la recta.
- El error de predicción del modelo es 0.0133.

A partir de los datos del Anexo 18, se seleccionaron aproximadamente (por el método de Efecto Hall a régimen ) 35 valores de la zona lineal del electroimán, con valores de voltaje contra campo al cual se le llamó primera zona lineal, y se muestra en la Figura 2.4. Comparativamente existe una ventaja del modelo de la primera zona lineal, con respecto al modelo obtenido con todos los puntos medidos en el experimento (Figura 2.3), ya que es mayor el error de predicción del modelo con un valor de 0.0133 con todos los datos medidos, con respecto al modelo de la primera zona lineal que tiene un error de predicción del modelo de 0.0037, constatando que disminuye en un 25 %, por tanto es el mejor modelo de ajuste. Se justifica entonces el por qué dividir los datos del Experimento 1 completo para analizar la primera zona lineal, ya que como lo refiere la literatura especializada, siempre el error de predicción es menor hacia el centro del modelo y es mayor hacia los extremos, entonces el modelo se puede interpretar en una función que posee 2 partes (primera zona lineal y segunda zona que es la de saturación), donde la primera zona lineal es la que define la zona de trabajo, es decir los puntos de operación en dependencia de la linealidad del electroimán que se observa en la gráfica.



**Figura 2.4.** Gráfica de la zona lineal del electroimán.

El polinomio de ajuste queda de la forma siguiente (Anexo 21):

$$y = 0.0029 * V + 0.0026 \quad (2.2)$$

Donde el vector **u** es la entrada del modelo, por tanto se puede predecir el rango de valores del tramo lineal.

$$1.120\text{mV} \leq \mathbf{u} \leq 520.725\text{mV}$$

- Los coeficientes del polinomio de mejor ajuste son:  $a_2 = 0.0029$  y  $b_2 = 0.0026$ .
- Donde  $a_2$  y  $b_2$  son los coeficientes que describen la recta.
- El error de predicción del modelo es: 0.0037.

En el tramo 1 el error real con respecto al estimado del modelo completo, es de 1% en cada punto de la predicción, se observa que la línea pasa aproximadamente por el centro de los puntos.

Durante el análisis de esta primera zona lineal se planificó la correspondencia de este experimento con los posteriores a régimen dinámico, utilizando una escala de trabajo en la que se puede medir en el gaussímetro, aunque se puede llegar a medir hasta 35 T, solo se utiliza en este punto  $\pm 12$  kG, para hacer las mediciones experimentales compatibles con la dinámica del electroimán, ver Figura 2.5.



**Figura 2.5.** Escala de trabajo del gaussímetro.

Sin embargo se tiene que mediante esta escala se puede convertir de tesla a voltaje, entonces se plantea la relación siguiente para todos los posteriores experimentos:

$$\frac{24 \text{ kG}}{20 \text{ V}} = 1.2 \text{ kG/V}$$

Es necesario que los resultados sean compatibles durante todos los experimentos, ya que la dinámica del electroimán se obtiene mediante valores de campo para los cuales le corresponde un valor de voltaje determinado:

Luego si  $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G} = 10 \text{ kG}$ , entonces  $1.2 \text{ kG} = 0.12 \text{ T}$ , por tanto  $0.12 \text{ T/V}$  puede ser el factor de conversión a tener en cuenta en la gráfica de la Figura 2.4. A continuación se calculan para algunos valores la correspondencia para un punto de operación determinado, el valor en tesla que representa en voltio.

**Tabla 2.3.** Conversión de algunos puntos B(T) a voltio (V).

|                   |      |      |      |      |     |
|-------------------|------|------|------|------|-----|
| <b>B (T)</b>      | 0.25 | 0.5  | 0.75 | 1    | 1.2 |
| <b>Voltio (V)</b> | 2.08 | 4.16 | 6.25 | 8.33 | 10  |

A partir de la Figura 2.4 se calcula la pendiente que es igual a la ganancia del sistema, para ello se escogieron en el MATLAB de la zona lineal de la gráfica, los puntos para calcular la pendiente, teniendo en cuenta la compatibilidad para obtener la ganancia a través de los valores convertidos en voltajes. Donde las coordenadas  $x, y$  son las siguientes:

$$x_2 = 400.3 \text{ mV} ; y_2 = 1.152 \text{ T}$$

$$x_1 = 301.2 \text{ mV} ; y_1 = 0.87 \text{ T}$$

$$K = m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2.3)$$

$$m = \frac{1.152 \text{ T} - 0.87 \text{ T}}{400.3 \text{ mV} - 301.2 \text{ mV}}$$

$$m = \frac{\frac{0.282 \text{ T}}{0.12 \frac{\text{T}}{\text{V}}}}{99.1 \text{ mV}} = \frac{2.35 \text{ V}}{0.099 \text{ V}} = 23.7$$

En esta zona lineal del electroimán a régimen estacionario, la ganancia es de 23.7. La segunda zona de saturación no se recomienda para operar el electroimán (Anexo 22).

## 2.4. Histéresis del electroimán Bruker BE-38

El lazo de histéresis se obtuvo en el entrehierro de aire del electroimán, donde se colocan las muestras para efectuar las mediciones, y por tanto es la región de interés; su trazado siempre comienza en el valor máximo de corriente, la obtención de este ciclo de histéresis tiene como ventaja principal, ubicar el valor de corriente que se le debe proporcionar al equipo para obtener un determinado valor de campo. Se demuestra la capacidad que tiene actualmente el sistema de generar valores de campo hasta los 2.0 T (Anexo 23).

Para la medición del valor de campo magnético establecido en el electroimán, y de esta forma obtener el lazo de histéresis se siguen los siguientes pasos, por el método de Efecto Hall:

1. Para las mediciones se utiliza un sensor transversal Lake Shore.
2. Luego se procede al encendido del sistema magnético.
3. Se coloca el sensor dentro del área efectiva 5 mm.
4. Se eleva el valor de inducción magnética al máximo.
5. Se esperan intervalos regulares de tiempo (aproximadamente 1 min a 2 min) para ir descendiendo en los valores de campos.
6. Al alcanzar una intensidad de la corriente cero, se invierte la polaridad de la fuente y se comienza a ascender en los valores de inducción hasta llegar al valor máximo.
7. Al llegar al valor máximo se comienza a descender.

Luego se vuelve a invertir la polaridad de la fuente y se cierra el ciclo. Esta técnica se emplea para las mediciones de campo magnético entre los polos del electroimán, lo que permite acumular puntos que ayudan al trazado del lazo de histéresis. Al terminar el ciclo de mediciones, se retorna a cero el potenciómetro, y luego de transcurridos 35 minutos, el valor de campo magnético remanente para saturación fue 57.3 G, con un valor de campo magnético de 1.103 mV a una temperatura de 25 °C (todas las mediciones se realizaron a 25 °C). El valor de 57.3 G, es el valor constante al cual retorna el campo magnético, luego de elevar este hasta la saturación y retornarlo a cero. La siguiente curva muestra el tramo de imanación del lazo de histéresis. No se realiza una segunda corrida de datos, pues la diferencia del campo inicial y el remanente, es estrecha de 3 G, lo cual caracteriza la calidad del material ferromagnético del imán, ya que presenta una curva de histéresis muy estrecha, se muestra en la Figura 2.6 el tramo descendente (**TDLH** en rojo) y el Tramo ascendente (**TALH** en azul). Interceptos del lazo de histéresis con los ejes coordenados.

La grafica de la Figura 2.6, muestra el lazo de histéresis del electroimán (ampliación del paso por cero), representando el paso de ambos tramos por la proximidad del cero, que es la zona donde se destaca con puntos rojos la imanación remanente (eje de B) y la fuerza coercitiva (eje de la tensión eléctrica), y los interceptos de los ejes coordenados se estiman en términos de tensión, una coercitividad de 2.175 mV en el semieje positivo de las abscisas, y un valor de -2.277 mV en el negativo. Se puede estimar una remanencia de 65.921 G, que es un valor pequeño, debido al material magnéticamente blando del cual está constituido el electroimán.

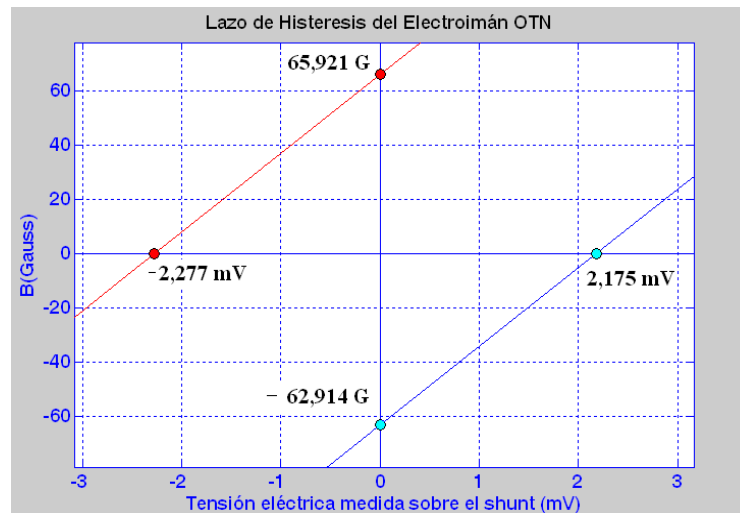


Figura 2.6. Lazo de histéresis del electroimán y su ampliación del paso por cero.

### 2.4.1. Análisis de la inductancia del electroimán

El campo magnético generado por el electroimán fue simulado en el programa profesional Comsol Multiphysics v. 5.0, un paquete comercial de programa de análisis y resolución por el método de los elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multifísicos (Anexo 5).

La inductancia de un electroimán como el de la OTN varía de manera no lineal con el campo magnético, debido a la presencia del núcleo ferromagnético, por lo que se obtiene mediante simulación por métodos numéricos utilizando el programa profesional Comsol Multiphysics v. 5.0, se obtienen los puntos para diferentes valores de inductancia.

Se resuelve de esta manera un problema magnetostático **3D**, de frontera abierta, con materiales isotropos no lineales, en presencia de corrientes eléctricas. La ecuación resuelta fue la ley de Ampere para el potencial magnético vectorial  $\vec{A} = A_x \hat{e}_x + A_y \hat{e}_y + A_z \hat{e}_z$ :

$$\vec{\nabla} \times \left( \frac{\vec{\nabla} \times \vec{A}}{\mu} \right) = \vec{j} \quad (2.4)$$

El dominio de solución fue discretizado cuadráticamente. Una vez resuelta la ecuación para el potencial  $\vec{A}$ , el programa obtiene la inducción magnética  $\vec{B}$  a partir de:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (2.5)$$

Con el objetivo de obtener los mejores resultados, la aproximación que se usa para modelar el dominio abierto es la técnica de los elementos infinitos.

El dominio de solución fue la octava parte de la región limitada por una esfera de radio  $R_2=125$  cm centrada en el origen de coordenadas, conteniendo la octava parte del electroimán en su interior. Para la frontera exterior del modelo se utilizó la condición de frontera de aislante magnético:

$$\hat{e}_n \times \vec{A} = \vec{0} \quad (2.6)$$

Para la región comprendida entre la esfera de radio  $R_2$  y otra esfera de radio  $R_1=100$  cm se utiliza la condición de frontera de elementos infinitos. El valor inicial para el potencial magnético vectorial es establecido en cero.

Se genera una malla adaptativa de 103480 elementos tetraédricos y para resolver el sistema de ecuaciones lineales correspondiente se utilizó el código FGMRES con un factor en la estimación del error de 400 y un número máximo de iteraciones de 10000.

El material del yugo magnético del electroimán (acero con bajo contenido de carbono 1006) se selecciona teniendo en cuenta la mejor concordancia entre los resultados de las simulaciones y las mediciones de la inducción magnética en el entrehierro de aire (Comsol Multiphysics v. 5.0).

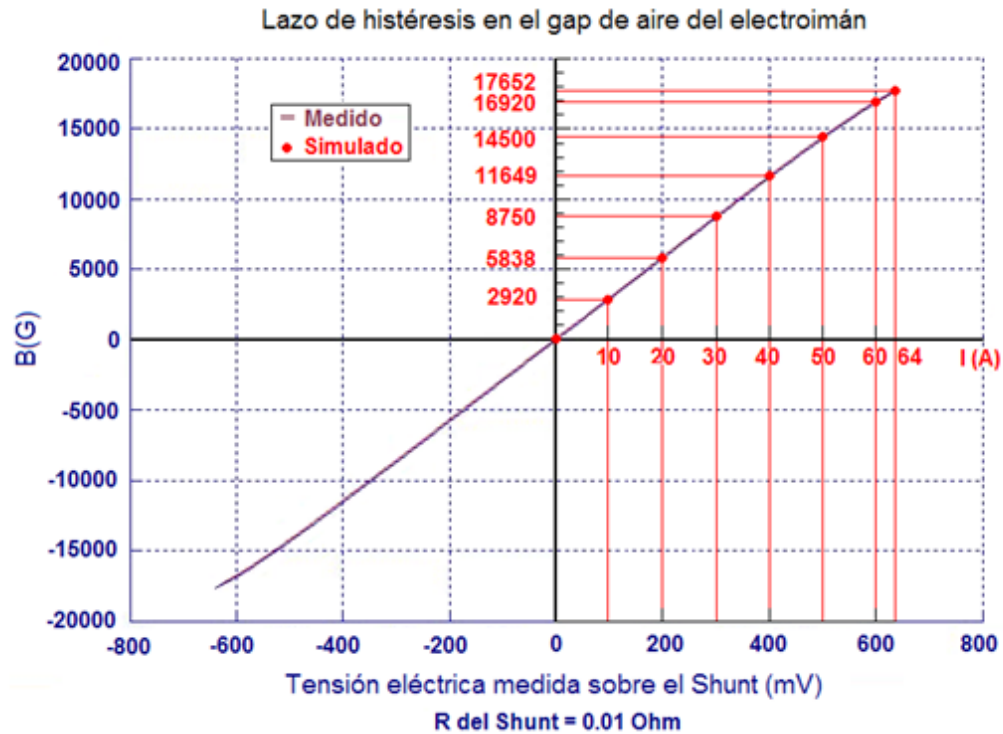
Se utiliza el MATLAB para generar el código (polinomioinduct.m) que permite graficar los interceptos de la inductancia y se muestra la curva  $B(H)$  del material que se utiliza (Anexo 24 y Anexo 25).

La inductancia del electroimán se determina a partir de su definición:

$$L \equiv \frac{\lambda}{I} = \frac{\int \vec{B} \cdot \vec{H} dV}{I^2} \quad (2.7)$$

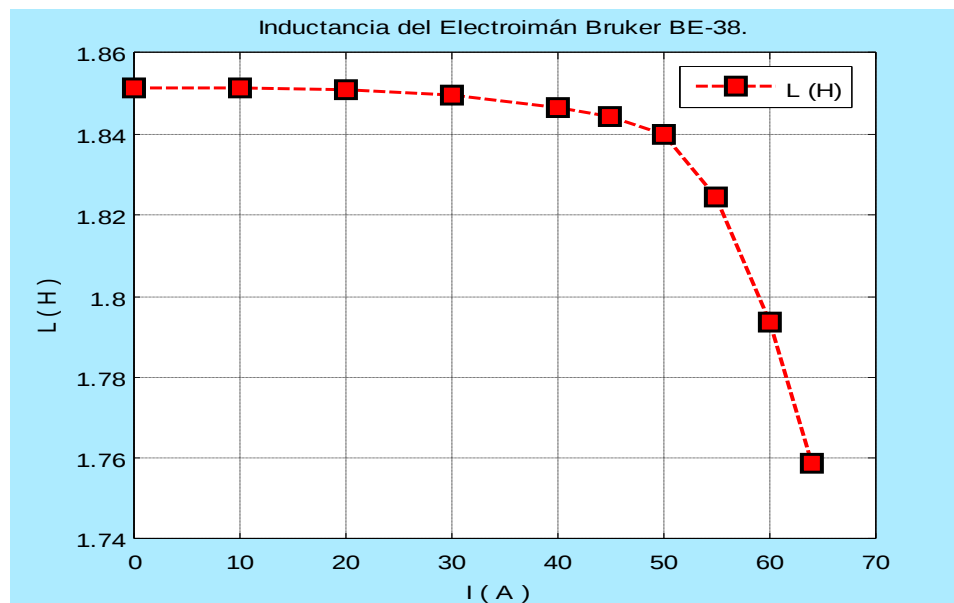
Donde  $\lambda$  es el enlace de flujo magnético a través de las bobinas,  $I$  es la intensidad de la corriente en estas,  $\vec{B}$  es el valor medio de la inducción magnética y  $\vec{H}$  es la intensidad del campo magnético a través del área  $S$  de la sección transversal de la base del polo.

Como resultado de las simulaciones en MATLAB y las mediciones de la inducción magnética en el entrehierro de aire del electroimán, que se observan en la tabla 2.3, existe una buena concordancia entre ambos y se grafican los valores de voltaje en la resistencia shunt contra los de campo en la Figura 2.7, y se muestra un mapa de la inducción magnética en el yugo magnético del electroimán, que se obtiene de las simulaciones para una intensidad de la corriente de 50 A (Anexo 26).



**Figura 2.7.** Comparación de los resultados de las simulaciones y las mediciones de  $B$ .

Los resultados de las simulaciones para la inductancia del electroimán de acuerdo con la ecuación 2.7, se muestran en la tabla 2.4 y se grafican en la Figura 2.8. Los valores de inductancia y de corriente para distintos puntos de operación, se obtienen a partir de hacer una aproximación del lazo de histéresis a una línea recta.



**Figura 2.8.** Inductancia del electroimán en función de la intensidad de la corriente.

**Tabla 2.4.** Valores de  $L$  (inductancia) de acuerdo con la ecuación 2.7, para valores de  $I$  (corriente).

|             |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>L(H)</b> | 1.8514 | 1.8514 | 1.8511 | 1.8496 | 1.8467 | 1.8443 | 1.8399 | 1.8243 | 1.7934 | 1.7588 |
| <b>I(A)</b> | 0.01   | 10     | 20     | 30     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     | 64     |

Como se puede ver, hasta una intensidad de la corriente de cerca de 50 A la inductancia varía poco, disminuyendo lentamente con la corriente. A partir de aquí disminuye rápidamente, indicando que se va haciendo más difícil la magnetización del yugo ferromagnético.

La inductancia del electroimán, de acuerdo con la ecuación 2.7, se ajusta a un polinomio de quinto grado, como se representa a continuación por método numérico:

$$L = a_1 I^5 + a_2 I^4 + a_3 I^3 + a_4 I^2 + a_5 I + a_6 \quad (2.8)$$

$$a_1 = -7.73296 \times 10^{-10}$$

$$a_2 = 7.97499 \times 10^{-8}$$

$$a_3 = -2.80321 \times 10^{-6}$$

$$a_4 = 3.42992 \times 10^{-5}$$

$$a_5 = -1.03822 \times 10^{-4}$$

$$a_6 = 1.85134$$

#### 2.4.2. Análisis de la permeabilidad relativa aparente del electroimán

Con las bobinas sin núcleo ferromagnético se obtiene  $L_0 = 0.18395$  H. Por tanto, para la permeabilidad magnética relativa aparente del electroimán  $k_{ap} \equiv L/L_0$  se obtienen los valores que se muestran en la tabla 2.4:

**Tabla 2.5.** Valores de  $k_{ap}$  de acuerdo con la ecuación 2.7 para valores de corrientes seleccionados.

|                            |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| <b><math>k_{ap}</math></b> | 10.065 | 10.065 | 10.063 | 10.055 | 10.039 | 10.026 | 10.002 | 9.917 | 9.749 | 9.561 |
| <b>I(A)</b>                | 0.01   | 10     | 20     | 30     | 40     | 45     | 50     | 55    | 60    | 64    |

La permeabilidad magnética relativa aparente del electroimán, de acuerdo la ecuación 2.7, se ajusta a un polinomio de quinto grado, lo que permite obtener lo siguiente:

$$k_{ap} = b_1 I^5 + b_2 I^4 + b_3 I^3 + b_4 I^2 + b_5 I + b_6 \quad (2.9)$$

$$b_1 = -4.12048 \times 10^{-9}$$

$$b_2 = 4.21008 \times 10^{-7}$$

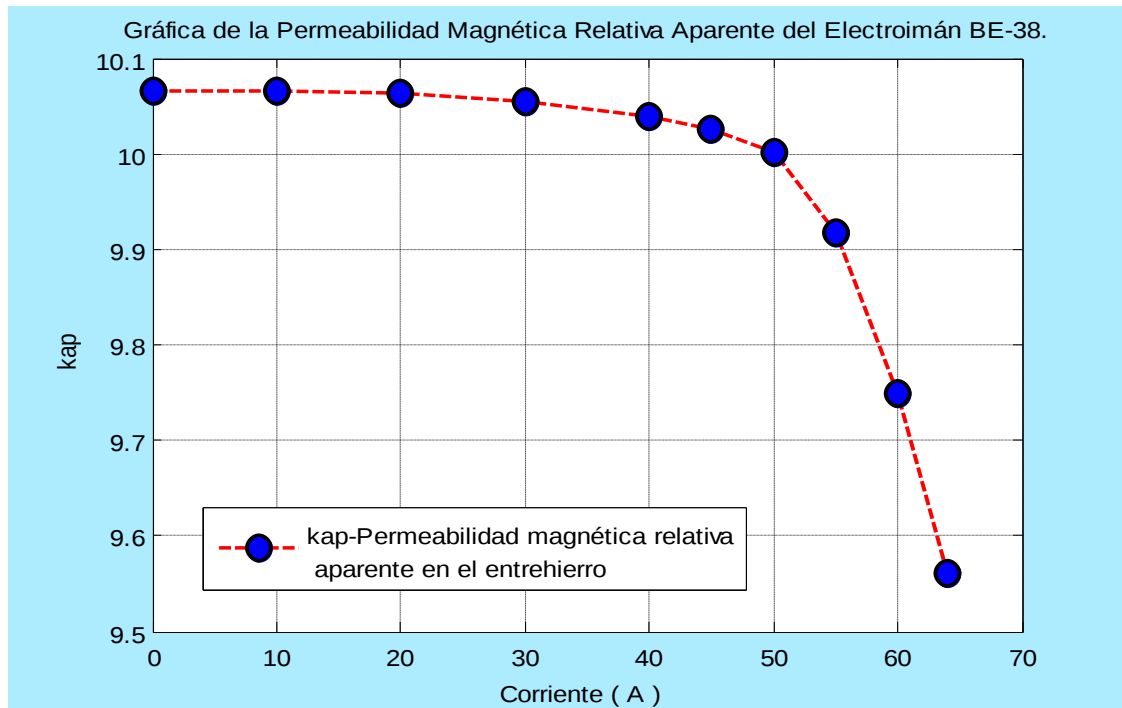
$$b_3 = -1.45828 \times 10^{-5}$$

$$b_4 = 1.72646 \times 10^{-4}$$

$$b_5 = -4.80303 \times 10^{-4}$$

$$b_6 = 10.06468$$

Los resultados de las simulaciones para la permeabilidad magnética relativa aparente del electroimán de acuerdo con la ecuación 2.7 se grafican en la Figura 2.9.



**Figura 2.9.** Permeabilidad magnética relativa aparente del electroimán en función de la intensidad de la corriente.

Para la permeabilidad magnética relativa del núcleo  $k \equiv B/(\mu_0 H)$  se obtienen los valores que se muestran en la tabla 2.6, donde  $B$  y  $H$  son valores promediados en el volumen del núcleo ferromagnético del electroimán:

**Tabla 2.6.** Valores de  $k$  para valores de corrientes seleccionados.

|             |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>k</b>    | 3882.3 | 3876.6 | 3804.5 | 3610.2 | 3282.8 | 3046.8 | 2685.3 | 1939.7 | 1240.2 | 869.47 |
| <b>I(A)</b> | 0.01   | 10     | 20     | 30     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     | 64     |

## 2.5. Modelo analítico del electroimán Bruker BE-38

A pesar del desarrollo computacional, existen otras técnicas que mantienen su vigencia, y permiten obtener un modelo matemático que represente el sistema en estudio, tal es el caso del análisis de los procesos por la vía analítica, mediante la cual se aplican las leyes físicas que describen el proceso.

En la Figura 2.10 se representa el circuito **RL** serie en el dominio del tiempo, con una fuente de corriente directa. Este circuito se analiza para obtener el modelo analítico del electroimán BE-38.

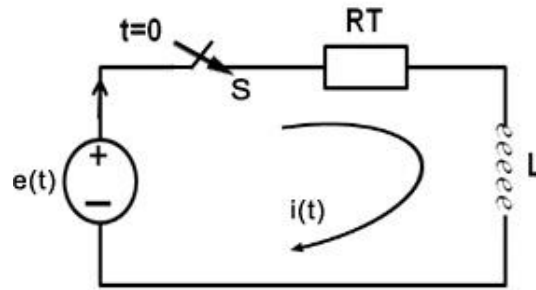


Figura 2.10. Circuito RL con fuente de corriente directa.

Para obtener la ecuación de la corriente para el circuito en cualquier instante posterior a  $t=0$  se debe plantear la ley de Kirchoff de voltajes. Según esta ley para cualquier instante la suma de los voltajes en la inductancia y en la resistencia deberá ser igual al voltaje de la fuente, es decir:

$$V_L + V_R = e \quad (2.10)$$

Si el interruptor **S** se cierra en el instante  $t=0$  la ecuación diferencial teniendo en cuenta los valores de voltajes  $V_L$  y  $V_R$  es:

$$L \frac{di(t)}{dt} + R i(t) = e(t) \quad (2.11)$$

Se ponen de manifiesto para determinar los voltajes las leyes en el caso del inductor y la resistencia siguiente:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \text{ (ley de Faraday) para el inductor.} \quad (2.12)$$

$$v(t) = R i(t) \text{ (ley de Ohm) para la resistencia.} \quad (2.13)$$

Entonces conociendo el lazo de histéresis del electroimán, se sustituye como una función univaluada, aproximada a una línea recta y se trabaja en la zona lineal (Figura 2.7), proponiendo el factor de proporcionalidad ( $K_B$ ) donde la pendiente de la recta pasa por el origen en la región del entrehierro, luego se propone la siguiente ecuación para conocer el valor del campo magnético, y es válida solamente en la zona lineal.

$$B = K_B I \quad (2.14)$$

$$e = R \frac{B}{K_B} + L \frac{d(\frac{B}{K_B})}{dt} \quad (2.15)$$

$$e = \frac{R}{K_B} B + \frac{L}{K_B} \frac{dB}{dt} \quad (2.16)$$

$$e = \left[ RB + L \frac{dB}{dt} \right] \frac{1}{K_B} \quad (2.17)$$

Multiplicando por  $K_B$ :

$$K_B e = RB + L \frac{dB}{dt} \quad (2.18)$$

Dividiendo por R:

$$\frac{K_B}{R} e = \frac{R}{R} B + \frac{L}{R} \frac{dB}{dt} \quad (2.19)$$

$$\frac{K_B}{R} e = B + \frac{L}{R} \frac{dB}{dt} \quad (2.20)$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$\frac{K_B}{R} E(s) = B(s) + \frac{L}{R} (s)B(s) \quad (2.21)$$

$$\frac{K_B}{R} E(s) = B(s) \left[ 1 + \frac{L}{R} (s) \right] \quad (2.22)$$

Por tanto, la función de transferencia  $B(s)/E(s)$ , puede ser hallada como sigue, la que por supuesto es de primer orden, donde posee elementos pasivos como la inductancia que acumula energía, e influye en el orden del sistema. Tener en cuenta no confundir la entrada del sistema:

$$H(s) = \frac{B(s)}{E(s)} = \frac{\frac{K_B}{R}}{\frac{L}{R}s + 1} \quad (2.23)$$

Donde  $K = \frac{K_B}{R}$  es la ganancia del sistema y  $T = \frac{L}{R}$  es la constante de tiempo.

## 2.6. Caracterización del electroimán (planta)

Es necesario caracterizar e identificar este sistema, donde los técnicos y especialistas puedan obtener un modelo matemático para el electroimán Bruker BE-38, siendo este el problema que motiva a la búsqueda de la obtención del modelo que les permita simplificar pero a la vez aproximar a la realidad los experimentos que se realizan actualmente en el laboratorio de magnetismo.

En la Figura 2.11 se muestra el sistema magnético que se estudia, donde el electroimán es el bloque a identificar. Se brindan detalles del proceso que son importantes para su identificación, tal es el caso de las variables que influyen en la medición del campo magnético, donde se tiene que la planta

presenta la siguiente forma: existe una variable de entrada que se manipula a la entrada de la fuente B-HS 90 (corriente eléctrica) y una de salida controlada (campo magnético).



Figura 2.11. Diagrama de la planta (entrada-salida).

### Variables y unidades de medidas presentes en el electroimán:

- Corriente  $I$  en la fuente B-HS 90, [A]
- Campo Magnético  $B$ , [T]

Para la adquisición de datos, la planta debe estar en estado estacionario, la señal de excitación es un escalón y es aplicada al proceso para un punto de operación, de esta manera no se producirán cambios bruscos en el sistema. Se tiene la generación de la señal de entrada  $u(t)$  a través de la fuente del electroimán operándola mediante una caja de resistencia, y finalmente la salida  $y(t)$  es captada por un sensor, ver Figura 2.12.

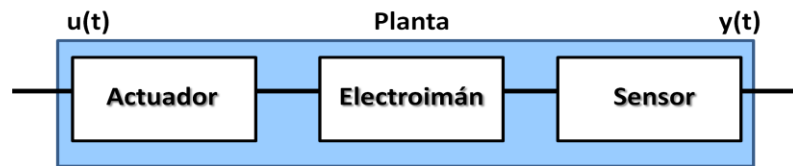


Figura 2.12. Planta formada por el conjunto: actuador, planta y sensor.

El actuador es una caja de resistencia que actúa directamente sobre la fuente del electroimán, permite que se produzca un determinado escalón a la entrada del mismo; la recepción de las señales de entrada-salida, ocurren mediante la interfaz de una tarjeta de adquisición de datos PCL-711B conectada a una computadora que posee un programa para guardar las mediciones en LabVIEW, ver Figura 2.13.

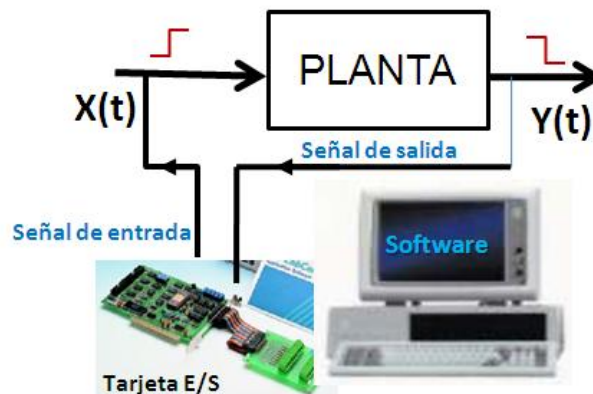


Figura 2.13. Interfaz de la computadora con el sistema de medición.

La caja de resistencia que funciona como actuador, permite mover el valor de referencia de la fuente para aumentar o disminuir la corriente que circula por las bobinas del electroimán. Esta corriente se mide indirectamente midiendo la caída de tensión en la resistencia de la shunt, y por ley de Ohm se obtiene el valor de la misma. Un escalón de tensión medido en la shunt equivale a un escalón de corriente circulando por las bobinas del electroimán.

### **2.6.1. Interfaz de la computadora con la tarjeta PCL-711B y el gaussímetro**

La interfaz para obtener las mediciones parten de una caja de resistencias que es la que permite manipular la fuente, donde el campo se registra mediante un sensor de Efecto Hall acoplado al gaussímetro, el cual posee un puerto auxiliar (pines 3 y 6) que permite registrar mediante la conexión con la tarjeta PCL-711B que se encuentra ubicada en el bus ISA de la computadora los valores medidos de entrada y salida (Anexo 27 y Anexo 28).

Este gaussímetro DSP modelo 475 posee tres salidas analógicas, la de interés y que se utiliza para obtener las mediciones es la salida 3. Esta salida 3 se genera a partir de un convertidor D/A controlado por el microprocesador, tiene diferentes modos de operación, uno de ellos es la salida de un voltaje proporcional al campo que se lee. Por defecto, el instrumento está configurado para que la salida tenga  $\pm 3.5$  V, proporcional al rango seleccionado a máxima escala. El voltaje de la salida analógica 3 se puede configurar para trabajar en  $\pm 10$  V (máximo) para el rango seleccionado. Los voltajes con límites altos y bajos se pueden configurar de manera que, los voltajes más bajos sean iguales a  $\pm$  la escala completa para el rango seleccionado. El buffer de datos es hasta 1000 mediciones, posee conexión a través de interfaces serie, paralela, y mediante IEEE-488. Se emplean en la medición de campo magnético por su fácil implementación y además son equipos manuales, donde la unidad de medición del campo magnético es en **G** (gauss) y como se sabe se puede convertir en el Sistema Internacional (SI) en T (tesla), donde  $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$  (Maloof, 2004).

**Para el gaussímetro se especifica un rango de trabajo de la siguiente manera:**

1. Campo de medición establecido:  $\pm 12 \text{ kG}$ .
2. Voltaje equivalente a la salida:  $\pm 10 \text{ V}$ .

**La tarjeta PCL-711B posee las siguientes características:**

La tarjeta de adquisición de datos PCL-711B es multifuncional es fácil de usar y con un costo realmente bajo. Las especificaciones que pueden implementarse mediante la programación, la hace una solución popular para un amplio rango de aplicaciones industriales y de laboratorio. Dentro de sus principales características se puede encontrar:

- Fabricante Advantech.
- Conexión con la PC mediante el bus ISA.
- Entradas analógicas, 8 entradas simples.
- Salidas analógicas, 1 salida analógica unipolar.

- Entradas digitales, 16 entradas digitales compatibles con lógica TTL.
- Salidas digitales, 16 salidas digitales compatibles con lógica TTL.
- Inicio de conversión, puede ser dado por programa, temporizador programable 8253 o una señal externa.
- Transferencia del dato por programa o por interrupción.
- Rangos programables de entrada analógica de,  $\pm 5$  V,  $\pm 2.5$  V,  $\pm 1.25$  V,  $\pm 0.625$  V,  $\pm 0.3125$  V.
- Rango de salida analógica seleccionable por jumper de 0V a 5 V o de 0 V a 10 V.
- Lenguajes de programación **BASIC, PASCAL, C, C++, LabVIEW**, entre otras.

**Para la tarjeta PCL-711B se especifica un rango de trabajo de la siguiente manera:**

1. Campo de medición de la tarjeta:  $\pm 5$  V.

El campo de variación de la señal proveniente de la caja de resistencia es un escalón de excitación:  $\pm 1.25$  V.

Una vez que se conoce el ajuste cada uno de los rangos para trabajar tanto con el gaussímetro y la tarjeta, es importante saber que se utiliza el método de Efecto Hall, donde se estableció en la zona lineal un rango de trabajo entre 1 kG y 5 kG. Luego se programa la interfaz usuario en LabVIEW 6i, que permite tomar los datos a la salida mediante la tarjeta PCL-711B (Anexo 29), (Anexo 30), (Anexo 31). Mediante la programación en el LabVIEW 6i, se ejecuta una aplicación en la PC, se sigue un algoritmo que se muestra en el Anexo 31, así como los pasos para explicar la selección de la toma de datos de los canales, entrada y salida. Se representa cada una de las interfaces que permitieron conectar cada uno de los bloques desarrollados para la adquisición de datos de la entrada y la salida, además se visualiza el panel frontal para la captura de las mediciones.

Se utiliza un tiempo de muestreo  $T_m = 500$  ms (empírico inicialmente) donde es necesario muestrear con un tiempo bajo con el objetivo de poder captar toda la dinámica del sistema, y se escogió teniendo en cuenta la constante de tiempo del proceso, donde  $T_s$  es el tiempo de establecimiento. Luego se corrobora según la literatura técnica donde se plantea sobre la influencia del mismo en la estimación de los parámetros por pérdida de información a la hora de realizar la toma de datos, que el tiempo de muestreo debe ser el siguiente aproximadamente en los experimentos realizados:

$$T_m = \frac{T_s}{20} \quad (2.24)$$

## **2.7. Modelo experimental para el electroimán mediante técnicas de identificación**

La identificación realizada comienza cargando en el espacio de trabajo del MATLAB versión.7.8, los datos de entrada-salida del proceso bajo estudio. Una vez cargados los datos se procede a realizar un análisis de los mismos para determinar las acciones que se llevarán a cabo en el pre-procesamiento de estos, luego se selecciona la estructura del modelo y se estiman sus parámetros. Mediante los comandos para estimar el orden del modelo obteniendo para valores específicos de  $n_a$ ,  $n_b$  y  $n_k$ ,

selección que se validará posteriormente mediante el análisis de los residuos y se verificará por medio de la comparación de la respuesta del sistema ante una entrada escalón, con la respuesta ante esta misma entrada, del Experimento 1 de estimación con respecto al Experimento 3 de validación de los datos.

**A continuación se enumeran los pasos fundamentales para llevar a cabo la identificación de sistemas mediante esta herramienta.**

1. Crear el objeto de datos: lograr una buena recolección de los datos para cada uno de los experimentos, la ausencia de ruidos en las señales, la correcta selección del período de muestreo y la buena correlación existente entre la salida y la entrada conlleva a la obtención de un adecuado modelo matemático.
2. Procesamiento previo de datos (filtrado, remover medias y tendencias, separar datos para estimación y validación de modelos).
3. Estimación del modelo: Selección del orden y especificación de la estructura y parámetros del modelo.
4. Validación: análisis residual, respuestas temporales, comparación entre la salida del sistema y la salida del modelo.

La identificación de sistemas ofrece una alternativa confiable, práctica y de bajo costo para determinar un modelo satisfactorio en control. Las limitaciones son impuestas por el proceso a modelar más que por el procedimiento de identificación.

El análisis detallado de estas gráficas que representan las mediciones de los experimentos es de vital importancia, ya que mediante su observación es posible determinar si existen datos que deberían excluirse del experimento (porque muestran tendencias muy distantes del resto de los datos), o si es necesario el uso de un filtro, y de ser así, en qué rango de frecuencias deben filtrarse estos datos. Posteriormente pueden seleccionarse subconjuntos de datos para estimación y validación, luego se selecciona una estructura para el modelo y se estiman sus parámetros.

Para comenzar la identificación de la planta, se cargaron los datos de entrada-salida del proceso en el espacio de trabajo del MATLAB 7.8, que fue el utilizado en el procesamiento de los datos medidos, se pueden generar los ficheros punto m (\*.m), los cuales fueron hechos para la Identificación del electroimán, que consistieron en tomar los datos de los ficheros txt que se adquirieron del programa LabVIEW 6.0, tanto para el escalón de subida como de bajada (Anexo 32 del Experimento 1), (Anexo 33, Anexo 34, Anexo 35 y Anexo 36 que corresponden al Experimento 2), (Anexo 37 del Experimento 3).

**Programas para procesar los datos medidos e identificar el electroimán.**

1. **reptosident.m**: se crea el objeto de datos, donde se preparan los datos, ya que al ejecutarlo se crean todas las variables de los tres experimentos en el Workspace (Anexo 38).

2. **proident.m**: mediante este programa se cargan todas las variables que contienen las mediciones de entrada y salida en el momento de la subida y la bajada, preparando así los datos para la identificación. Al ejecutarlo se grafican los datos de los tres experimentos (Anexo 39) y se le resta la componente de offset, además quedan preparados los datos para simularlo con el Simulink del MATLAB.
3. **esqfiltradodisc.mdl**: se hizo la simulación mediante el Simulink, utilizando la librería que posee, donde se colocaron cada uno de los bloques entre ellos los filtros discretos y su conexión con un osciloscopio, quedando los datos filtrados del Experimento 1 y 3.
4. **progidentcont.m**: permite capturar los datos filtrados del osciloscopio del Simulink, para conocer según el modelo paramétrico ARX que se utiliza cual es la mejor estructura. Se grafican las estructuras para conocer las mejores combinaciones de los posibles valores de  $n_a$ ,  $n_b$ , y  $n_k$ , así como hacer un análisis de la correlación en el procesamiento de los datos del experimento 1 y 3 (Anexo 40).
5. **valident.m**: este programa es para validar, permite hacer una comparación de los modelos para conocer cuál es el que mejor ajusta, tomando para validar los datos del experimento 3 como una estructura ARMAX (Anexo 41).

### 2.7.1. Análisis de los datos del Experimento 1

Los datos (entrada-salida) que se analizan en el Experimento 1 se obtuvieron con un escalón (se analizaron todos los datos del experimento) a la entrada de magnitud 15.34 mV, donde el intervalo de muestreo fue de 500 ms (Anexo 32), Figura 2.14.

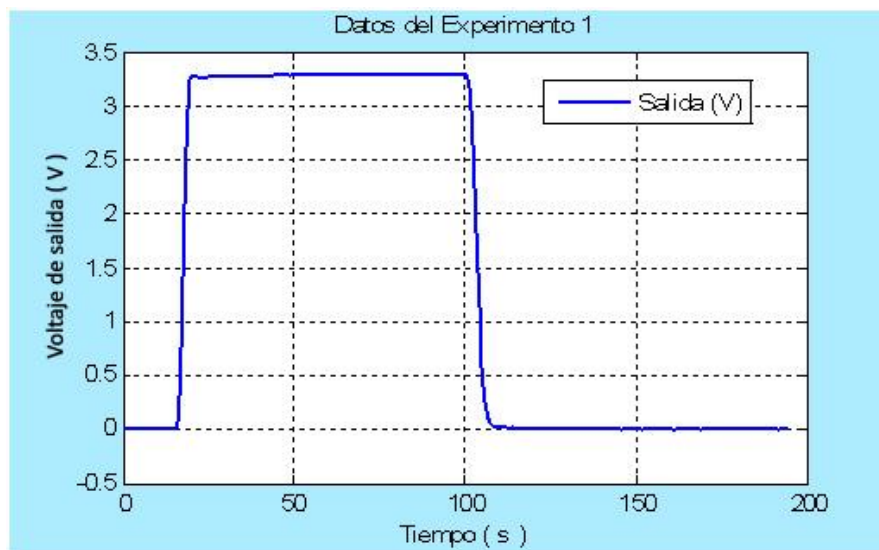


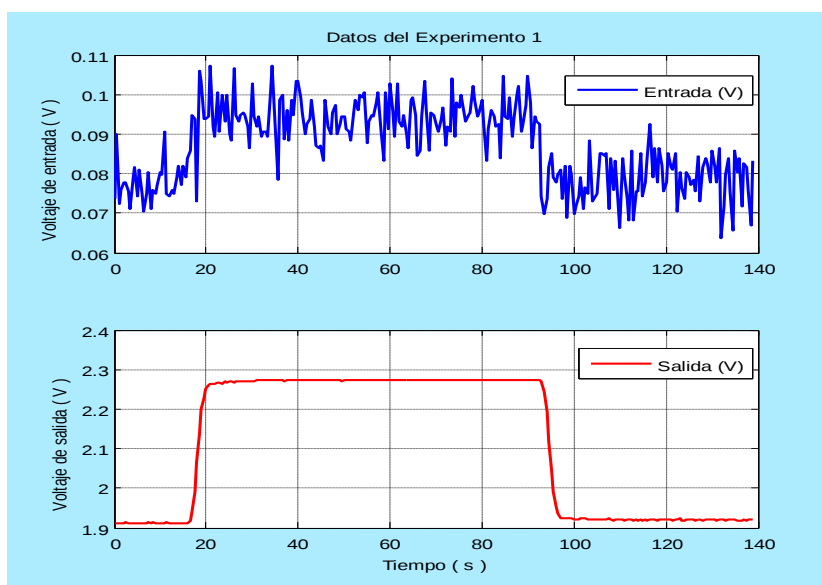
Figura 2.14. Entrada escalón del Experimento 1.

Los datos de entrada-salida del **Experimento 1 para evaluación** están recogidos en un fichero (txt), del cual mediante la tarjeta de adquisición se registraron los datos provenientes del sensor de Efecto Hall del gaussímetro, se muestran en la Figura 2.15. Este fichero contiene un conjunto de datos de entrada-salida de 279 muestras (160 para la subida y 119 para bajada).

**Tabla 2.7.** Punto de operación medido con el sensor del gaussímetro.

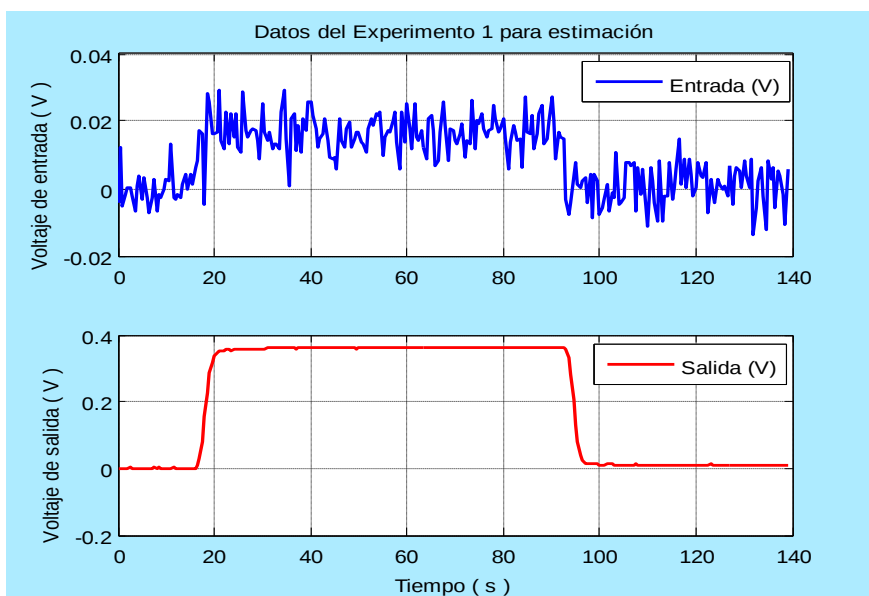
| Salida campo       |         | Salida voltaje (DC) | Entrada voltaje (DC) | Corriente |
|--------------------|---------|---------------------|----------------------|-----------|
| Punto de operación | 2.30 kG | 1.91 V              | 78.81 mV             | 7.88 A    |
| Escalón arriba     | 2.73 kG | 2.27 V              | 94.15 mV             | 9.42 A    |
| Escalón abajo      | 2.31 kG | 1.92 V              | 78.83 mV             | 7.88 A    |

Los datos del Experimento 1 de entrada-salida se muestran en la Figura 2.15, los cuales se filtraron.



**Figura 2.15.** Conjunto de datos de entrada-salida filtrado del Experimento 1.

En la Figura 2.16 se muestran los datos del Experimento 1 de entrada-salida, a los cuales se le eliminó la componente de offset.



**Figura 2.16.** Datos de entrada-salida con el filtrado del Experimento 1 sin offset.

### 2.7.2. Análisis de los datos del Experimento 3

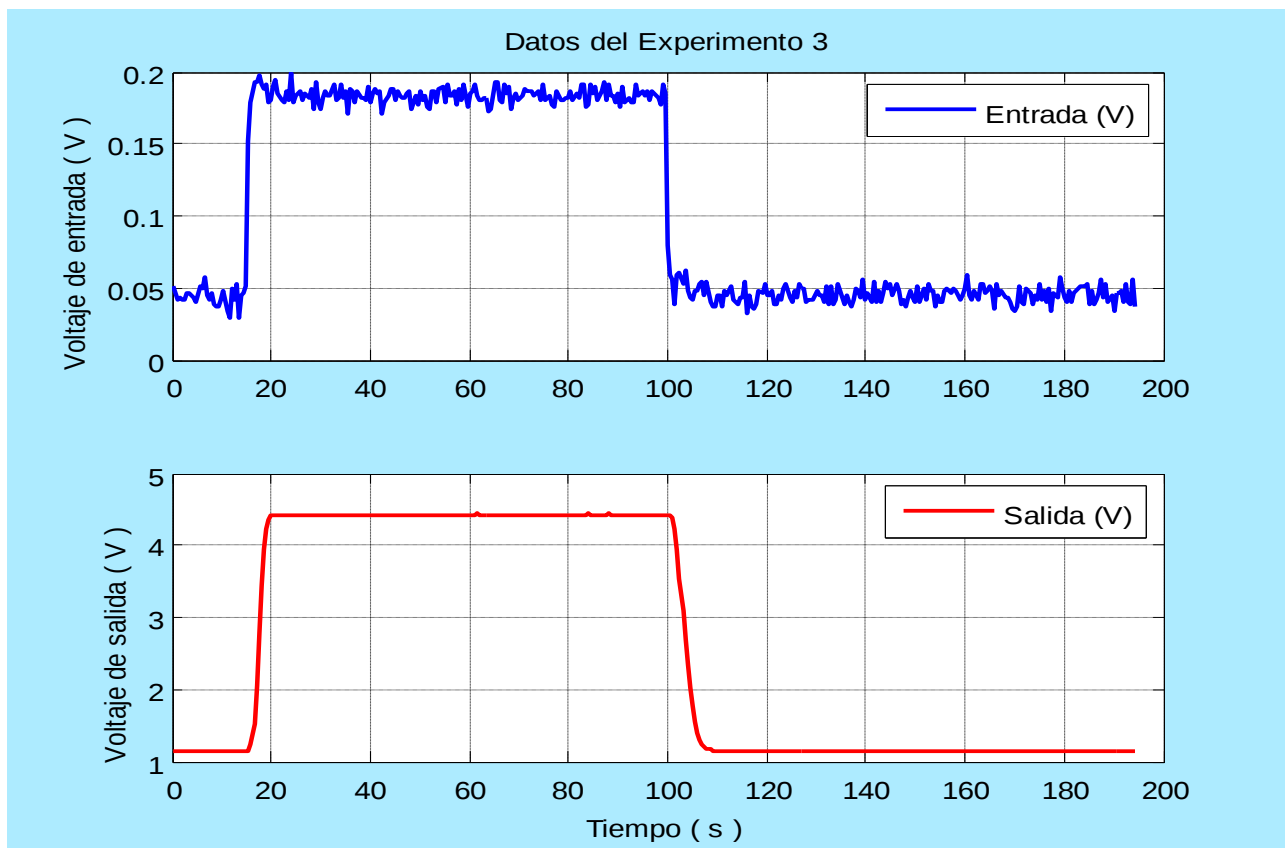
Los datos (entrada-salida) que se analizan en el Experimento 3 se obtuvieron con un escalón (se analizaron todos los datos del experimento) a la entrada de magnitud **138.11 mV**, donde el intervalo de muestreo fue de 500 ms, Figura 2.17 y Figura 2.18 (Anexo 37).

Los datos de entrada-salida del **Experimento 3 para validación** están recogidos en un fichero (txt), del cual mediante la tarjeta de adquisición se registraron los datos provenientes del sensor de Efecto Hall del gaussímetro. Este fichero contiene un conjunto de datos de entrada-salida de 390 muestras (189 para la subida y 201 para bajada).

**Tabla 2.8.** Punto de operación del Experimento 3.

| Salida campo       |           | Salida voltaje (DC) | Entrada voltaje (DC) | Corriente |
|--------------------|-----------|---------------------|----------------------|-----------|
| Punto de operación | 1.360 kG  | 1.13380 V           | 45.60 mV             | 4.56 A    |
| Escalón arriba     | 5.3169 kG | 4.43308 V           | 183.71 mV            | 18.4 A    |
| Escalón abajo      | 1.3575 kG | 1.13099 V           | 45.60 mV             | 4.56 A    |

Los datos del Experimento 3 de entrada-salida se muestran en la Figura 2.17, los cuales se filtraron.



**Figura 2.17.** Conjunto de datos de entrada-salida filtrado del Experimento 3.

En la Figura 2.18 se muestran los datos del Experimento 3 de entrada-salida, a los cuales se le eliminó la componente de offset.

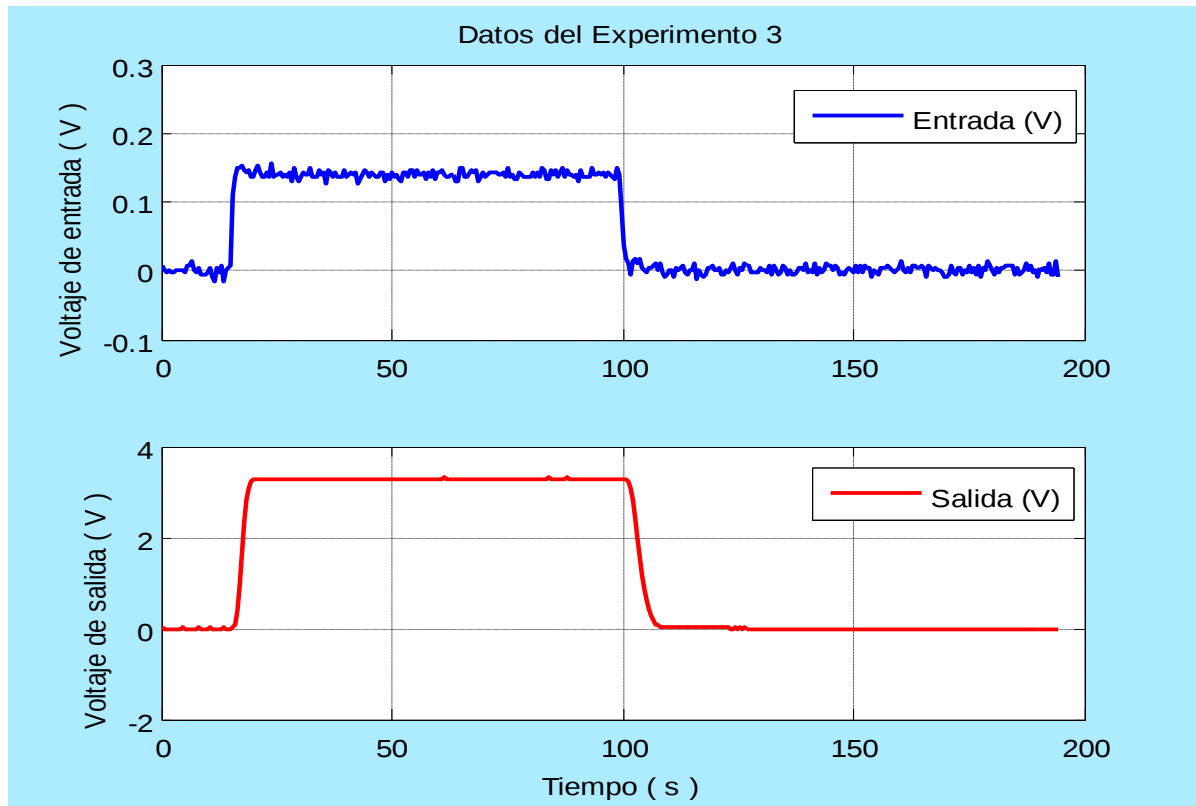
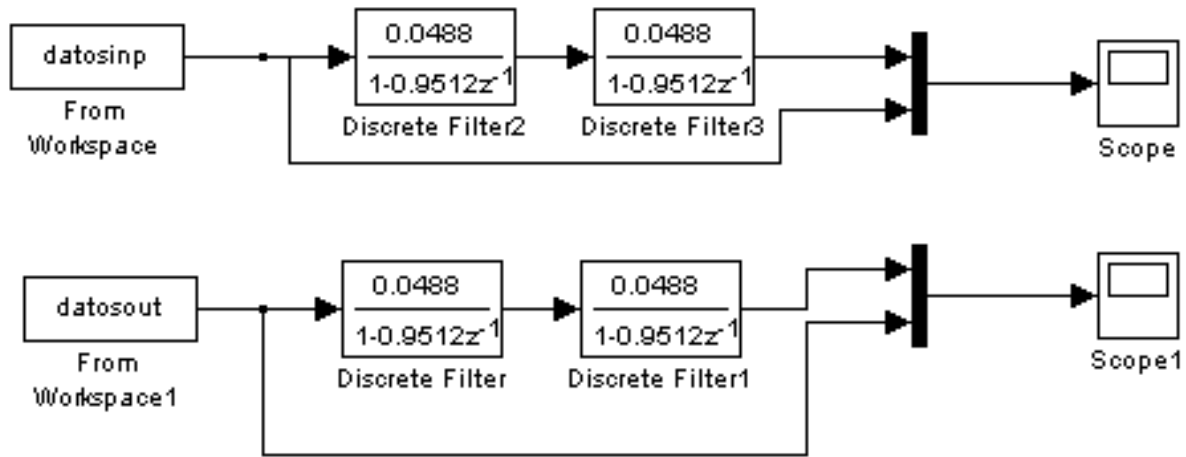


Figura 2.18. Conjunto de datos de entrada-salida filtrado del Experimento 3 sin el offset.

### 2.7.3. Filtrado discreto de los datos del los Experimento 1

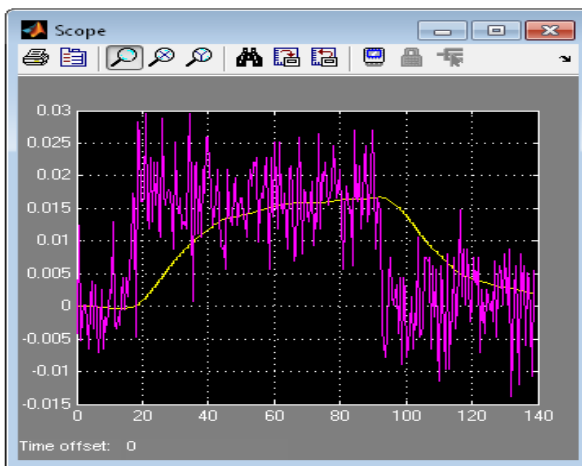
Los sistemas discretos o muestreados son muy importantes, debido fundamentalmente a la utilización de la técnica digital, que ha logrado desarrollar notablemente los aspectos del software como los de hardware, así como la disminución de los costos asociados a su empleo.

Se tomaron los datos del Experimento 1 del espacio de estado del MATLAB y se filtraron mediante filtros discretos de Respuesta Infinita al Impulso (IIR, Infinite Impulse Response). En el caso de estos filtros, la expresión de la función de transferencia en el dominio  $z$  es en forma de cociente de polinomios. Por eso, la forma de obtener en general la salida en este tipo de filtros es mediante fórmulas recursivas. Durante la simulación que se muestra en la Figura 2.19 se usaron 4 filtros IIR y se colocaron a la salida dos osciloscopios.

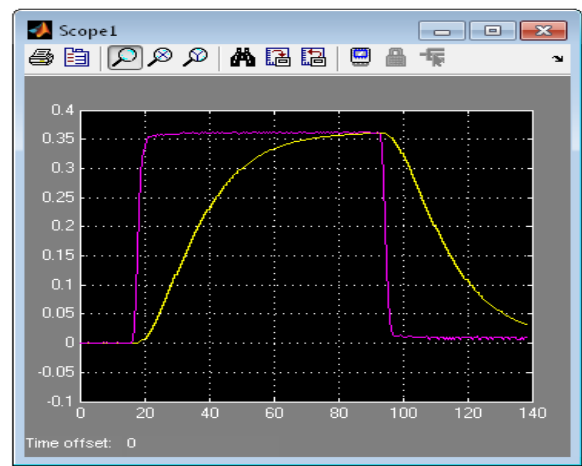


**Figura 2.19.** Conjunto de datos filtrados de entrada-salida del Experimento 1.

Se tomaron los datos de entrada y se filtraron, se removieron las tendencias lineales para eliminar la componente de CD, a la salida se colocó un osciloscopio, se muestra en la Figura 2.20 a), donde se observan los datos de entrada de color rosado con el ruido y la salida amarilla. Los datos de salida filtrados en la Figura 2.20 b) donde se evidencia los beneficios que tiene el uso del filtro, como queda la curva amarilla completamente filtrada, se han quitado las fluctuaciones que aparecían en la entrada.



a)



b)

**Figura 2.20.** Gráfica del Osciloscopio de la señal de entrada y salida. a) Entrada del osciloscopio con el ruido. b) Salida del osciloscopio 1 sin ruido.

#### 2.7.4. Selección mediante técnicas de identificación de las estructuras ARX

En todo proceso de identificación es conveniente probar varias estructuras y diferentes órdenes dentro de cada estructura hasta encontrar el modelo satisfactorio, que mejor se ajuste a los datos obtenidos experimentalmente de la planta real. En general, la mayoría de los métodos de validación

tratan de determinar si la respuesta del modelo se ajusta con suficiente exactitud a los datos de entrada-salida obtenidos mediante experimentación para la aplicación requerida.

Se utiliza el comando **step(ze)** para estimar la demora o retardo del modelo, donde **ze** es el nombre del objeto.

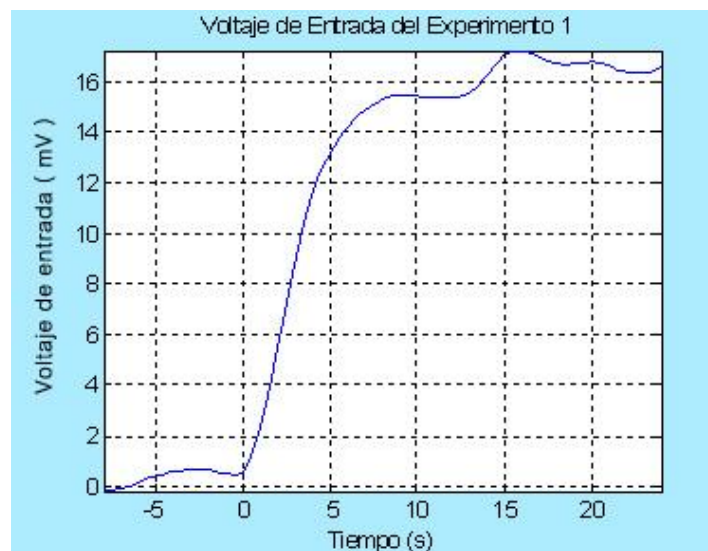
**La estructura ARX es una ecuación en diferencia, una simple estructura paramétrica caja-gris donde el orden de cada uno de los polinomios na, nb:**

**na:** grado del polinomio del denominador.

**nb:** grado del polinomio del numerador.

**nk:** es el número de retardos entre la entrada y la salida.

Antes de analizar cual estructura ARX ajusta mejor el modelo para el electroimán, se observa la entrada medida del Experimento1 en la Figura 2.21, notando que el retardo del modelo es nulo, donde los datos de entrada medidos responden al escalón de entrada del Experimento 1 de 15.34 mV.



**Figura 2.21.** Voltaje de entrada del Experimento 1 para estimación con la estructura ARX.

Es posible seleccionar el orden de los parámetros de un modelo **ARX (na, nb y nk)** basados en dos criterios de error: El criterio del **Error de Predicción Final de Akaike (AIC o FPE)** y el criterio de **Aproximación de Mínima distancia de Rissanen (MDL)**. Mediante esta técnica se obtuvieron varios modelos, los modelos ARX cuyas estructuras fueron escogidas de acuerdo con los dos criterios de selección del orden antes mencionados (AIC y MDL). El intervalo del tiempo de muestreo para todos los experimentos fue de 0.5 s.

Los polinomios que aparecen para cada una de las pruebas de los modelos ARX obtenidos, corresponden a los datos resultantes, la variable **q** que se observa, es una variable en tiempo discreto, que puede ser tomada con la variable **z**.

A continuación para cada uno de las estructuras ARX del Experimento 1 evaluadas, se utilizó el comando IDPOLY, donde los modelos discretos obtenidos por esta vía responden a la estructura general siguiente (Discrete-time IDPOLY model:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$ ):

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + e(t) \quad (2.25)$$

Donde A y B son polinomios en el operador de retraso  $q^{-1}$ .

### 1. Modelo ARX para el mejor ajuste rojo propuesto por el MATLAB (marx2) se obtiene lo siguiente:

En la Figura 2.22 se observa el resultado del MATLAB donde se indican los órdenes de los modelos que mejor se ajustan a los datos, y se ve que hay dos criterios el MDL y el AIC, que coinciden para las barras de color rojo y azul. La barra de color roja es la que mejor ajusta pero sin embargo complejiza el orden del modelo, ya que tiene el orden siguiente donde, **na= 4, nb= 4, nk= 1**.

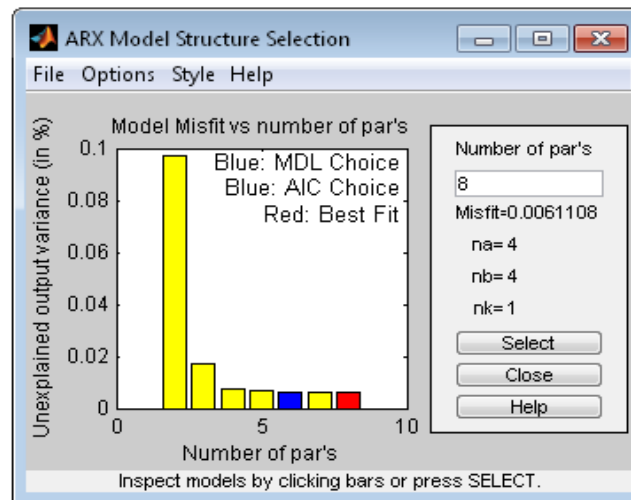


Figura 2.22. Selección del orden de los parámetros según los criterios AIC y MDL. Barra roja na=4, nb=4, nk=1.

$$A(q)=1-3.803 (+0.02427)q^{-1} + 5.484 (+0.07047)q^{-2} - 3.555 (+0.06904)q^{-3} + 0.8738 (+0.02278) q^{-4}$$

$$B(q)=0.2989(+0.05995)q^{-1} - 0.3767(+0.1516)q^{-2} - 0.03845(+0.1546)q^{-3} + 0.116(+0.06344)q^{-4}$$

### 2. Modelo ARX para el ajuste azul propuesto por el MATLAB (marx1), se obtiene lo siguiente:

En este caso como la diferencia de tamaño en las barras de color azul y roja es tan pequeña se prefiere probar con la barra de color azul, donde ambos criterios (MDL y el AIC) también coinciden en que la mejor estructura ARX posee el orden siguiente, **na= 4, nb= 2, nk= 1**.

$$A(q)=1 - 3.826 (+0.02442)q^{-1} + 5.553 (+0.07075)q^{-2} - 3.622 (+0.06929)q^{-3} + 0.8951 (+0.0229)q^{-4}$$

$$B(q)=0.1475 (+0.02225)q^{-1} - 0.1506 (+0.02254)q^{-2}$$

### 3. Modelo ARX para el ajuste amarillo propuesto por el MATLAB (marx3) , se obtiene lo siguiente:

Se prueba también con la barra que está en el medio de la barra roja y azul, por tener un tamaño aproximadamente igual.

$$A(q)=1-3.831(+0.02466)q^{-1}+ 5.554(+0.0721)q^{-2}- 3.612 (+0.07106)q^{-3}+ 0.889 (+0.02356)q^{-4}$$

$$B(q)=0.325(+0.05862) q^{-2}- 0.5746(+0.1158)q^{-3}+ 0.2483(+0.06014) q^{-4}$$

### 4. Modelo ARX para un ajuste propuesto1 (marx4) donde $n_a=1$ , $n_b=1$ , $n_k=1$ , se obtiene lo siguiente:.

$$A(q) = 1 - 0.8089 (+0.005022) q^{-1}$$

$$B(q) = 4.183 (+0.1097) q^{-1}$$

### 5. Modelo ARX para un ajuste propuesto2 (marx5) donde $n_a=4$ , $n_b=1$ , $n_k=1$ , se obtiene lo siguiente:

$$A(q) = 1 - 3.887 (+0.02441) q^{-1} + 5.689 (+0.073) q^{-2} - 3.719 (+0.07304) q^{-3} + 0.9161 (+0.02445) q^{-4}$$

$$B(q) = -0.0005757 (+0.002018) q^{-1}$$

### 6. Modelo ARX para un ajuste propuesto3 (marx6) donde $n_a=2$ , $n_b=1$ , $n_k=1$ , , se obtiene lo siguiente:

$$A(q) = 1 - 1.993 (+0.007695) q^{-1} + 0.9944 (+0.006446) q^{-2}$$

$$B(q) = 0.02407 (+0.0294) q^{-1}$$

### 7. Modelo ARX para un ajuste propuesto4 (marx7) donde $n_a=2$ , $n_b=2$ , $n_k=1$ , , se obtiene lo siguiente:

$$A(q) = 1 - 1.879 (+0.006691) q^{-1} + 0.8772 (+0.006331) q^{-2}$$

$$B(q) = 2.823 (+0.1227) q^{-1} - 2.863 (+0.1243) q^{-2}$$

### 8. Modelo ARX para un ajuste propuesto5 (marx8) donde $n_a=3$ , $n_b=1$ , $n_k=1$ , , se obtiene lo siguiente:

$$A(q) = 1 - 2.986 (+0.01041) q^{-1} + 2.972 (+0.0206) q^{-2} - 0.9865 (+0.01026) q^{-3}$$

$$B(q) = -0.004441 (+0.004999) q^{-1}$$

A continuación en la Figura 2.23 a) de la salida estimada por el modelo ARX de la gráfica y en el gráfico de la Figura 2.23 b) es la predicción del error del voltaje de la salida estimada por el momento que se suministra un escalón al electroimán.

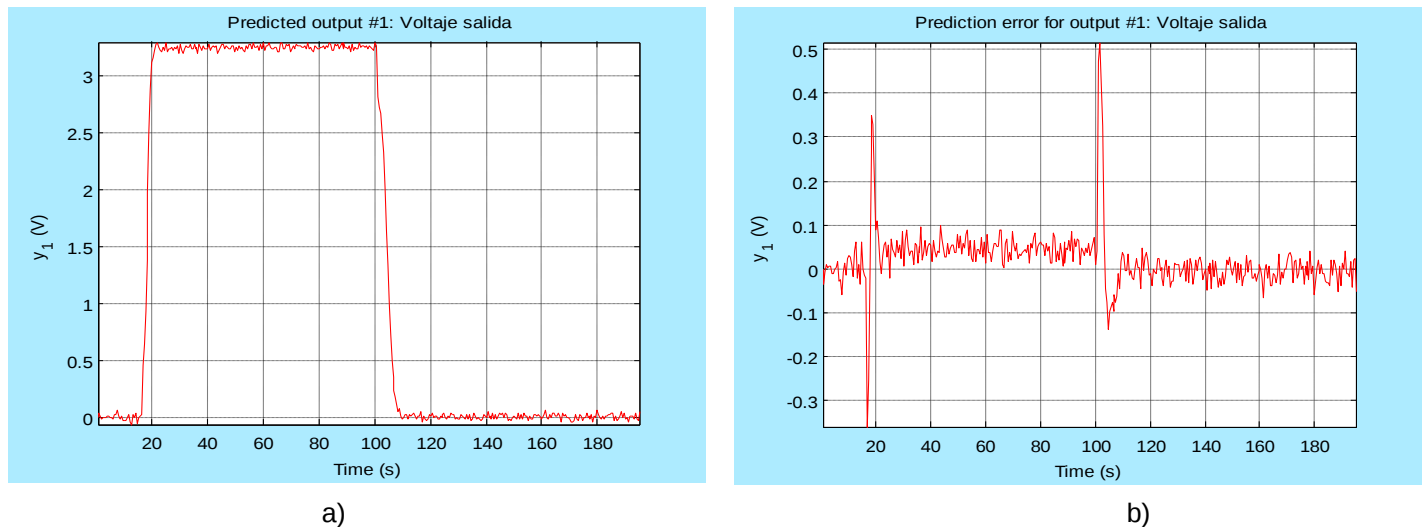


Figura 2.23. Estimación del voltaje. a) Salida de Modelo ARX, b) Entrada-Salida del modelo ARX.

Tabla 2.9. Estructuras ARX y su función de pérdida.

| ARX                    | Orden           | Parámetros       | Función de pérdida (FP)               |
|------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|
| Barra azul (marx1)     | 4 <sup>to</sup> | na=4, nb=2, nk=2 | FP: 8.05182e-011 y FPE 8.39813e-011   |
| Barra roja (marx2)     | 4 <sup>to</sup> | na=4, nb=4, nk=1 | FP: 7.51966e-011 y FPE 7.9509e-011    |
| Barra amarilla (marx3) | 4 <sup>to</sup> | na=4, nb=3, nk=2 | FP: 8.21949e-011 y FPE 8.63193e-011   |
| Propuesto1 (marx4)     | 1 <sup>ro</sup> | na=1, nb=1, nk=1 | FP: 1.78885e-006 and FPE 1.8145e-006  |
| Propuesto2 (marx5)     | 4 <sup>to</sup> | na=4, nb=1, nk=1 | FP: 9.38779e-011 and FPE 9.72427e-011 |
| Propuesto3 (marx6)     | 2 <sup>do</sup> | na=2, nb=1, nk=1 | FP: 2.03601e-008 and FPE 2.0798e-008  |
| Propuesto4 (marx7)     | 2 <sup>do</sup> | na=2, nb=2, nk=1 | FP: 6.91695e-009 and FPE 7.11529e-009 |
| Propuesto5 (marx8)     | 3 <sup>ro</sup> | na=3, nb=1, nk=1 | 5.82047e-010 and FPE 5.98737e-010     |

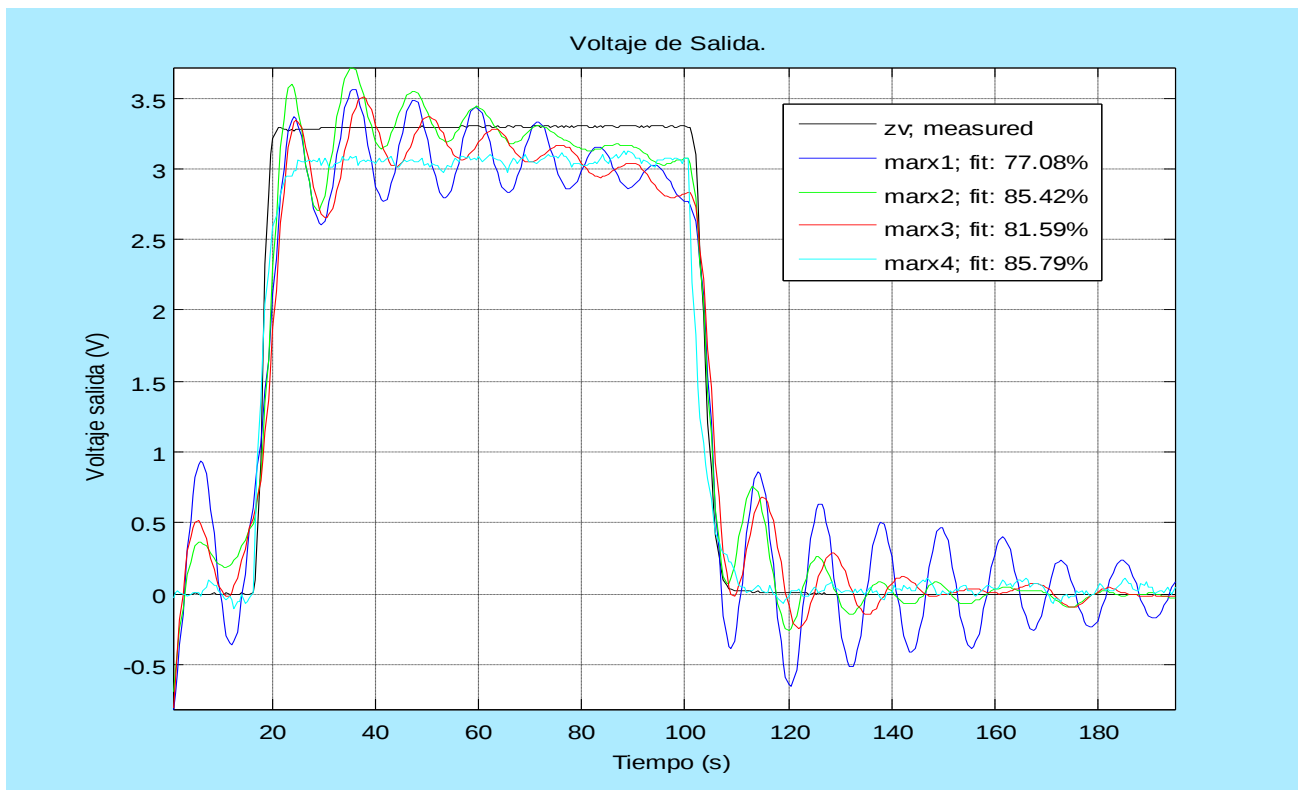
### 2.7.5. Estimación de los resultados de las estructuras ARX

Se utilizaron las funciones para la selección de la estructura óptima de un modelo del MATLAB (arxstruc, selstruc y struc), en el programa **progidientcont.m**, se puede estimar el orden de simples modelos ARX, para un rango de órdenes y demoras.

- arxstruc:** toma la salida de struc y estima sistemáticamente un modelo ARX para cada orden del modelo, y compara la salida del modelo con la salida medida, devolviendo la función de pérdida de todas las estructuras.

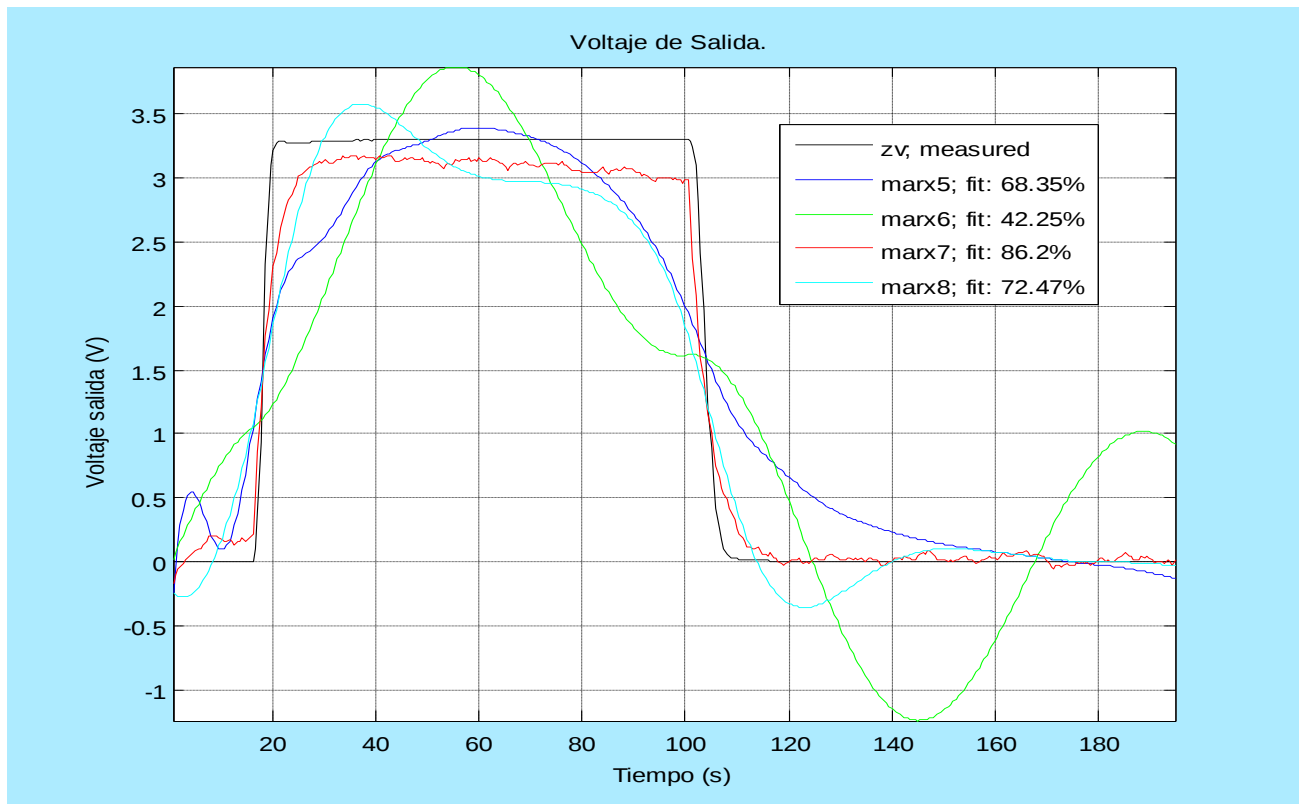
- **selstruc:** toma la salida proveniente de `arxstruc` y abre una ventana, donde aparecen remarcados con unos rectángulos para las estructuras ARX: El rojo para el mejor ajuste minimiza la suma de los cuadrados de la diferencia entre los datos de salida para validación y el del modelo, en un paso adelante. El azul para el mejor criterio se minimiza (AIC). Selecciona de todas las estructuras que presentan una menor función de pérdida.
- **struc:** generación de un conjunto de estructuras, devuelve una matriz con todas las estructuras resultantes de combinar los órdenes  $n_a$ ,  $n_b$  y  $n_k$  pasados como parámetros de entrada.

Como se explicó anteriormente los datos entrada–salida que se utilizaron en los experimentos se obtuvieron con un escalón a la entrada del Experimento 1. Al ejecutar el programa de validación de los modelos (**valident.m**), permite hacer una comparación mediante la instrucción `compare(zv,marx1,marx2,marx3,marx4)` de un conjunto de estructuras ARX, para obtener como se muestra en la gráfica de la Figura 2.24 los diferentes modelos y sus ajustes (Anexo 34).



**Figura 2.24.** Gráfica de los polinomios ARX con su ajuste (`marx1`, `marx2`, `marx3`, `marx4`).

Luego se analizaron también mediante la instrucción `compare(zv,marx5,marx6,marx7,marx8)`, otros polinomios para cada uno de los modelos ARX, ya que todas las curvas en un mismo gráfico son difíciles para describir, el comportamiento de cada una de las curvas. En la Figura 2.25 se observan los diferentes modelos y sus ajustes que responden a las estructuras programadas.



**Figura 2.25.** Gráfica de los polinomios ARX con su ajuste (marx5, marx6, marx7, marx8).

Se puede resumir de las gráficas de las estructuras ARX anteriores, en la Figura 2.26 los tres mejores ajustes ARX son marx2, marx4 y marx7, donde el gráfico marx2 (azul) tiene un ajuste de un 85.42%, pero tiene muchas oscilaciones, por tanto no se corresponde con la realidad de los datos medidos. Sin embargo el ajuste para el marx7 (rojo) es de un 86.2%, lo que se muestra que quedan por debajo del ajuste del marx4 (verde) que tiene un ajuste de un 85.79%, donde estas dos curvas obtenidas marx4, marx7 representan el funcionamiento dinámico del sistema con gran aproximación, puesto que se muestran los índices fit para estos dos casos ARX son superiores al 80%, que es un índice referencial de buen comportamiento en este tipo de identificación.

Los residuos de un sistema son los errores de predicción obtenidos de la diferencia entre la respuesta real del sistema y la del modelo estimado para la misma entrada. El análisis de correlación y los residuos para las mejores estructuras ARX (marx4 y marx7), se analizan en el Anexo 42 y el Anexo 43 donde se muestra que están dentro de los parámetros de ajuste para el marx4, por eso se escoge como el mejor ARX para comparar y validar con un ARMAX.

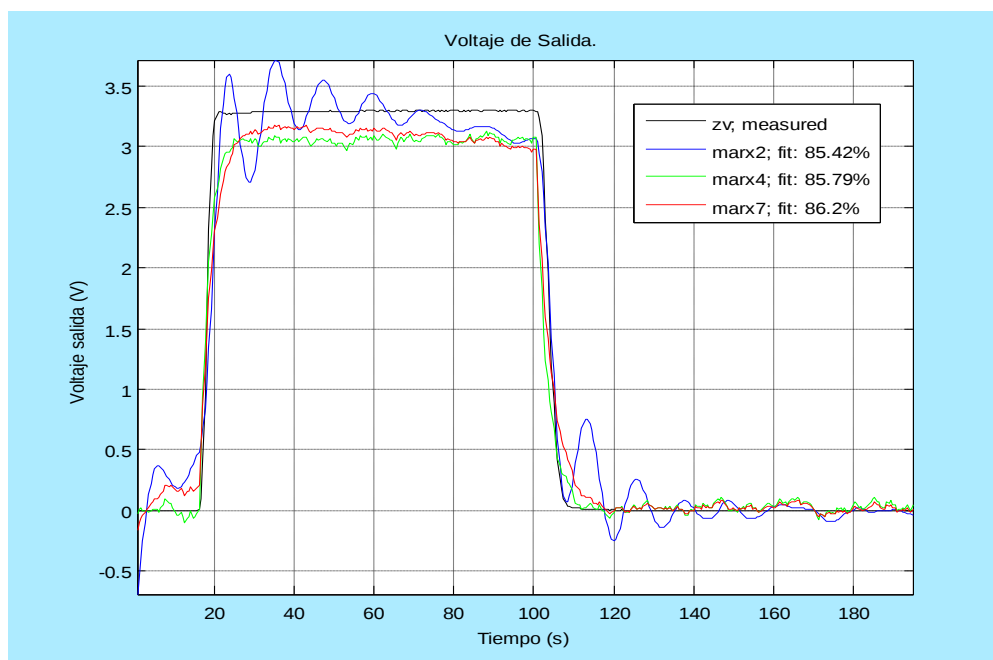


Figura 2.26. Gráfica de los mejores ajustes ARX (marx2, marx4, marx7).

Todos los polinomios con los órdenes analizados para cada uno de los modelos ARX, se muestran en la tabla siguiente, donde se observa el ajuste de un polinomio de primer orden que es el marx4 que se corresponde con el modelo analítico obtenido del electroimán.

Tabla 2.10. Estructuras ARX y su ajuste correspondiente.

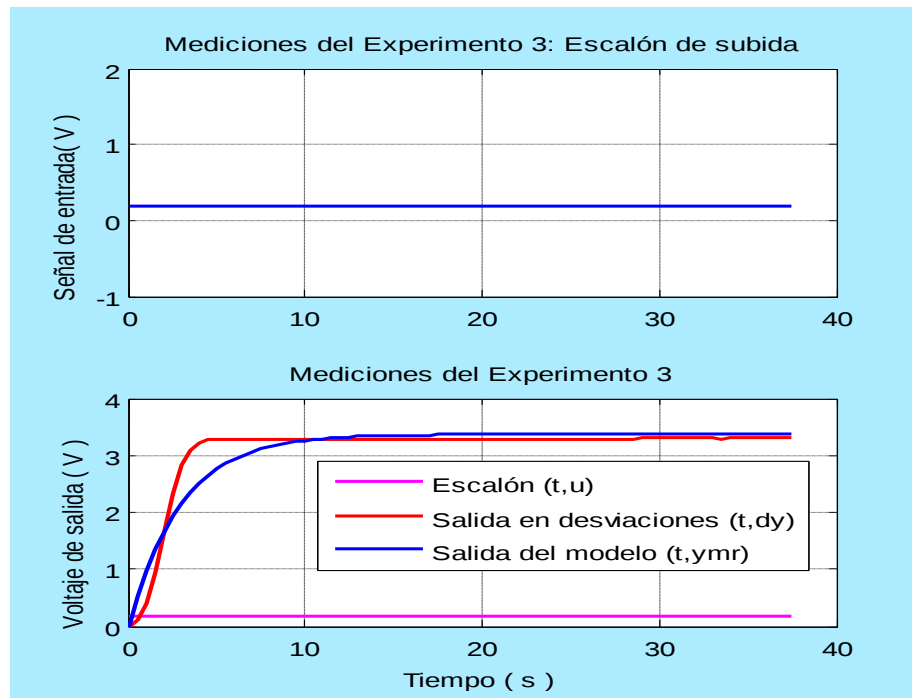
| ARX                    | Orden           | Parámetros       | Ajuste                               |
|------------------------|-----------------|------------------|--------------------------------------|
| Barra azul (marx1)     | 4 <sup>to</sup> | na=4, nb=2, nk=2 | MARX1 con un ajuste de 77.08%        |
| Barra roja (marx2)     | 4 <sup>to</sup> | na=4, nb=4, nk=1 | MARX2 con un ajuste de 85.42%        |
| Barra amarilla (marx3) | 4 <sup>to</sup> | na=4, nb=3, nk=2 | MARX3 con un ajuste de 81.59%        |
| Propuesto1 (marx4)     | 1 <sup>ro</sup> | na=1, nb=1, nk=1 | <b>MARX4 con un ajuste de 85.79%</b> |
| Propuesto2 (marx5)     | 4 <sup>to</sup> | na=4, nb=1, nk=1 | MARX4 con un ajuste de 68.35%        |
| Propuesto3 (marx6)     | 2 <sup>do</sup> | na=2, nb=1, nk=1 | MARX4 con un ajuste de 42.25%        |
| Propuesto4 (marx7)     | 2 <sup>do</sup> | na=2, nb=2, nk=1 | MARX4 con un ajuste de 86.2%         |
| Propuesto5 (marx8)     | 3 <sup>ro</sup> | na=3, nb=1, nk=1 | MARX4 con un ajuste de 72.47%        |

### 2.7.6. Obtención de modelos ARX para el Experimento 3 con el escalón construido

El Experimento 3 se analizó probando varios órdenes utilizando modelos obtenidos por simples estructuras ARX que aparecen en los anexos, para demostrar que se puede utilizar el mismo modelo para el escalón de subida como para el escalón de bajada, es decir, lo que se busca es conocer si gráficamente en el MATLAB el electroimán no experimenta grandes variaciones de la salida con

respecto a la entrada, y sus valores de ganancia son aproximadamente iguales, utilizando en este experimento un escalón construido donde no se utilizaron todos los datos Experimento 3, solo se tomó una parte de la subida y la bajada, eliminando varios datos de la zona estacionaria (Anexo 45 (escalón arriba) y el Anexo 46 (escalón abajo), Anexo 47, Anexo 48, son los programas para obtener la mejor estructura ARX).

En la Figura 2.27 se muestra la señal escalón que es la que se le suministra al electroimán, con 40 datos para este experimento, en este caso se puede observar que para un escalón de subida construido con algunos valores medidos de la entrada, se obtiene una gráfica evidentemente de segundo orden subamortiguado (rojo) y se hace una identificación con un modelo ARX (azul) de primer orden ( $n_a=1$ ,  $n_b=1$ ,  $n_k=1$ ) lo que es notable señalar que debido a la instrumentación que se utiliza para tomar las mediciones, donde el campo se registra mediante el Gaussímetro de Efecto Hall, el cual posee internamente una electrónica con determinados filtros pasa bajo que introduce una dinámica, que afecta la señal de entrada proveniente del sensor, lo que se puede interpretar como una alteración en el orden del sistema.



**Figura 2.27.** Gráfica del escalón de subida para un ARX con  $n_a=1$ ,  $n_b=1$ ,  $n_k=1$ .

Para el experimento realizado se obtienen los siguientes coeficientes para un modelo ARX:

Discrete-time IDPOLY model:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$

$$A(q) = 1 - 0.8438 (+0.01614) q^{-1}$$

$$B(q) = 2.925 (+0.2838) q^{-1}$$

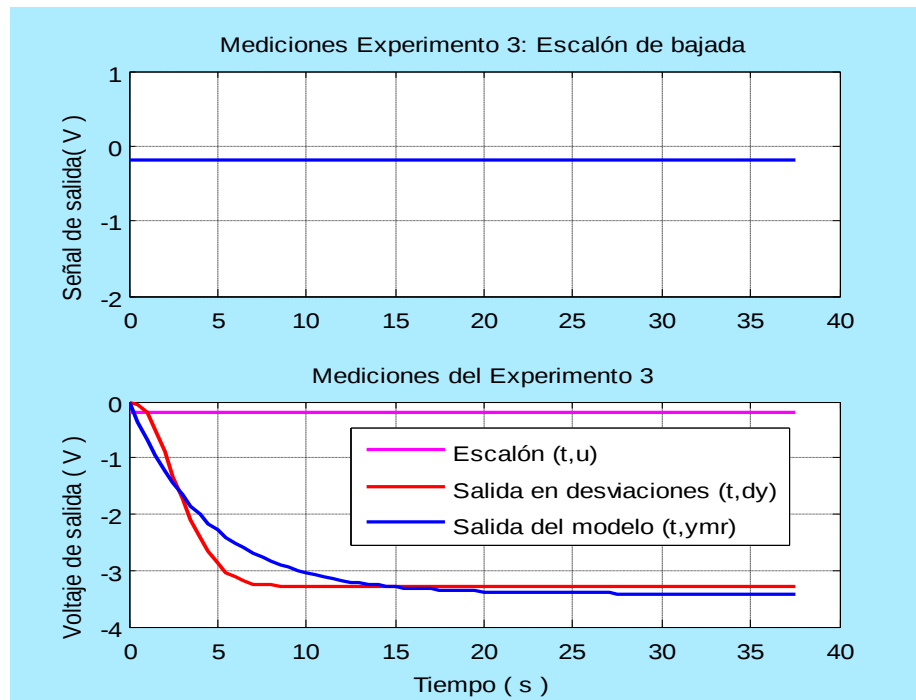
La función de pérdida: 0.00897162 y FPE 0.00944381

**La función de transferencia correspondiente para este modelo continuo es la siguiente:**

$$H(s) = \frac{6.36}{s + 0.3397} \quad H(s) = \frac{18.72}{4.51s + 1}$$

La ganancia es de 18.72, el tiempo de muestreo fue de 0.5 y el error cuadrático medio de 0.051.

La Figura 2.28 se muestra el escalón de bajada aplicado al electroimán, donde se obtiene una gráfica evidentemente de segundo orden subamortiguado (rojo) aproximadamente igual al escalón de subida de la Figura 2.28. Observando además que se obtiene mediante una identificación con un modelo ARX (azul) una gráfica de primer orden ( $n_a=1$ ,  $n_b=1$ ,  $n_k=1$ ).



**Figura 2.28.** Gráfica del escalón de bajada para un ARX con  $n_a=1$ ;  $n_b=1$ ;  $n_k=1$ .

Para el experimento realizado se obtienen los siguientes coeficientes para el modelo ARX que responden a la estructura general de la ecuación 2.26:

$$A(q) = 1 - 0.8951 (+0.009968) q^{-1}$$

$$B(q) = 1.992 (+0.1717) q^{-1}$$

La función de pérdida: 0.0045032 y FPE 0.00474021

La función de transferencia correspondiente para este modelo continuo es la siguiente:

$$H(s) = \frac{4.208}{s + 0.2217} \quad H(s) = \frac{18.98}{4.51s + 1}$$

- La ganancia de este modelo es de 18.98, el tiempo de muestreo fue de 0.5 y el error cuadrático medio de 0.057.

El resultado alcanzado mediante esta variante de tomar el escalón construido, se constató que existen modelos que no son de primer orden y sin embargo tienen un buen ajuste que se puede observar gráficamente, además poseen una ganancia aproximadamente alrededor del modelo de primer orden analizado en este acápite, poseen una buena predicción del modelo y la función de pérdida es pequeña.

Donde los mejores modelos para este tipo de experimento fueron con las estructuras ARX que responden a modelos de segundo, tercero y cuarto orden. Mediante la obtención de todos estos modelos para el electroimán, se considera que se puede proponer un modelo único, tanto para el escalón de subida como de bajada, lo que objetivamente la dinámica para la subida como para la bajada del escalón no fue significativa, es por lo que se puede asumir que son aproximadamente iguales.

$$H(s) = \frac{b_2s^2 + b_1s^1 + b_0}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s^1 + a_0} \quad (2.26)$$

## 2.8. Validación y comparación de los resultados

La validación y comparación de los resultados se efectuó analizando todos los datos medidos del Experimento 3. Para validar los resultados obtenidos se tomó la mejor estructura ARX de las mediciones analizadas del Experimento 1, que fue la marx4, lo que permitió proponer un ARMAX (armax1), mediante el programa del Anexo 41, y se analiza a continuación la estimación del modelo ARMAX.

**A través del comando IDPOLY de los modelos discretos obtenidos por esta vía responden a la estructura general siguiente para ARMAX:**

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + C(q^{-1}) \cdot e(t) \quad (2.27)$$

Donde A y B son polinomios en el operador de retraso  $q^{-1}$ .

$$A(q)=1-0.7888(+0.005215) q^{-1}, \quad B(q)=4.621 (+0.1139) q^{-1}, \quad C(q)=1 + q^{-1}$$

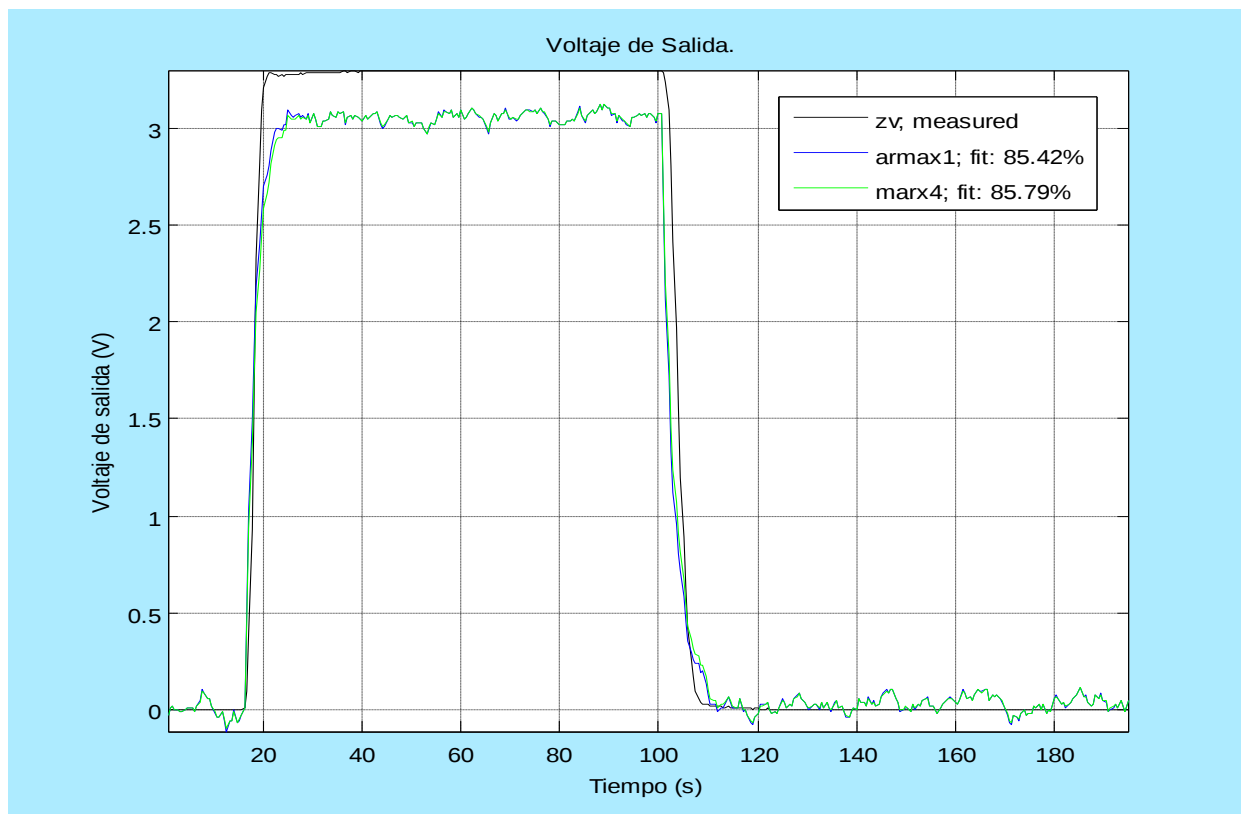
**Tabla 2.11.** Estructura ARMAX, su función de pérdida y ajuste para un intervalo de 0.5 s.

| ARMAX  | Orden           | Parámetros             | Función de pérdida (FP) y ajuste                                       |
|--------|-----------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| armax1 | 1 <sup>ro</sup> | na=1, nb=1, nk=1, nc=1 | FP: 4.83555e-007 y FPE 4.94105e-007<br>armax 1 con un ajuste de 85.42% |

El análisis de la correlación y los residuos del modelo ARMAX se muestra en el Anexo 44, la función de correlación residual de los valores del voltaje de salida quedan fuera de la banda completamente, aunque al final quedan todos dentro, no se considera el mejor para proponer el modelo final del sistema para el electroimán.

Este programa es para validar, permite hacer una comparación de los modelos para conocer cuál es el que mejor ajusta, tomando para validar los datos del Experimento 3 para proponer un ARMAX que permitiera comparar con el mejor de los modelos ARX.

Como se muestra en la Figura 2.29, el ARMAX evitó el problema de correlación y errores con gran dependencia en la salida, se observa un mejor ajuste, sin embargo, como no hubo una diferencia notable en el resultado, se considera un único modelo el identificado por el marx4.



**Figura 2.29.** Mejores ajustes ARMAX2 y ARX4.

Una aproximación muy natural para buscar una estructura adecuada, es simplemente la que surge de evaluar distintos modelos y comparar los resultados que ellos arrojen. Es importante aclarar que la etapa de validación del modelo (etapa final) se hace más efectiva si es que previamente se han descartado o filtrado los modelos de menor calidad, como se hizo en el acápite anterior.

### 2.8.1. Propuesta de los mejores modelos para el electroimán

El modelo que se propone por su mejor ajuste de datos es el ARX (marx4), es de primer orden y además se corresponde con los datos medidos, se tiene en cuenta ya que es de primer orden y coincide con el modelo analítico. Haciendo uso de los programas creados en MATLAB para el análisis de la identificación se obtiene el modelo lineal para el campo magnético del electroimán con la estructura ARX.

Los modelos que se proponen para el electroimán por su mejor ajuste de los datos, son el marx4 y el armax1, que son de primer orden. De ellos se analizaron que tienen los mejores ajustes de un 85.79% para el marx4 y un 85.42% para el armax1, además se realizó el análisis de la correlación y los residuos del voltaje de salida de los dos modelos con una buena correspondencia.

**Estructura ARX:** La función de transferencia correspondiente a este modelo es la siguiente:

$$H(s) = \frac{9.284}{s + 0.4242} \qquad H(s) = \frac{21.89}{2.36s + 1}$$

**Estructura ARMAX:** La función de transferencia correspondiente a este modelo es la siguiente:

$$H(s) = \frac{10.38}{s + 0.4745} \qquad H(s) = \frac{21.88}{2.11s + 1}$$

En el acápite 2.5 se obtuvo el modelo del electroimán por la vía analítica, mediante la cual se aplican las leyes físicas que describen el proceso, quedando de primer orden coincidiendo con el orden de del las estructuras ARX y ARMAX.

Para corroborar los valores numéricos de los modelos ARX y ARMAX, se sustituyen en el modelo analítico, los siguientes valores que corresponden a un punto de operación:

**Tabla 2.12.** Valores fijados para un punto de operación.

| Campo B | Corriente Shunt | Resistencia Shunt | Voltaje Shunt | Inductancia | Resistencia Bobina | Escala T a V                                               |
|---------|-----------------|-------------------|---------------|-------------|--------------------|------------------------------------------------------------|
| 0.25 T  | 10 A            | 0.01 $\Omega$     | 0.1 V         | 1.8514 H    | 0.9 $\Omega$       | $\frac{0.25 \text{ T}}{0.12 \text{ T/V}} = 2.08 \text{ V}$ |

$$H(s) = \frac{B(s)}{E(s)} = \frac{K}{\frac{L}{R}s + 1}, \text{ como } K = \frac{B}{I}$$

$$H(s) = \frac{B(s)}{E(s)} = \frac{K}{\frac{L}{R}s + 1} = \frac{\frac{B}{I}}{\frac{L}{R}s + 1} = \frac{\frac{0.25 \text{ T}}{10 \text{ A}}}{\frac{1.8514 \text{ H}}{0.9 \Omega}s + 1}$$

Haciendo el cambio de escala de tesla a voltio y conociendo el voltaje en la resistencia shunt, ya que el punto de operación es 10 A y la resistencia de la shunt es 0.01  $\Omega$ , se obtiene el modelo analítico de primer orden con los valores experimentalmente, y se muestra a continuación:

$$H(s) = \frac{E_0(s)}{E_1(s)} = \frac{\frac{B}{I}}{\frac{L}{R}s + 1} = \frac{\frac{2.08 \text{ V}}{0.1 \text{ V}}}{\frac{1.8514 \text{ H}}{0.9 \Omega}s + 1} = \frac{20.8}{2.06 s + 1}$$

La constante inductiva  $T_L$  de tiempo está dada por la expresión:

$$T_L = \frac{L}{R} \quad (2.28)$$

La unidad de medida de  $T_L$  tiene dimensiones de tiempo:

$$\frac{1 \text{ henry}}{\text{ohm}} = \frac{1 \cancel{\text{ henry}}}{\cancel{\text{ohm}}} = \left( \frac{1 \cancel{\text{ volt-seg}}}{1 \cancel{\text{ henry-amp}}} \right) \left( \frac{1 \cancel{\text{ ohm-amp}}}{1 \cancel{\text{ volt}}} \right) = 1 \text{ seg}$$

De esta manera se hace compatible el modelo analítico con los modelos experimentales que se obtienen a partir de que las variables de entrada y salida fueron tomadas en unidad de voltaje, no en campo unidad de campo magnético.

En la práctica, lo ideal es recurrir a una mezcla del método analítico y el método experimental para obtener el modelo final, como se explicó anteriormente. El uso de datos reales para identificar los parámetros del modelo provee a éste de una gran exactitud, pero la identificación se facilita cuanto mayor sea el conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso, es por ello que se analiza analíticamente el modelo del electroimán Bruker BE-38, para poder observar si el comportamiento es adecuado a los datos que se identifican. Se comprueba que los valores obtenidos por la identificación experimental y por la vía analítica coinciden en orden y los valores numéricos son aproximadamente iguales.

**Modelo ARX**

$$H(s) = \frac{21.89}{2.36 s + 1}$$

**Modelo ARMAX**

$$H(s) = \frac{21.88}{2.11 s + 1}$$

**Modelo analítico**

$$H(s) = \frac{20.8}{2.06 s + 1}$$

El modelo propuesto para el electroimán Bruker BE-38, parte de los tres modelos anteriores promediados, ya que son aproximados quedando de la siguiente manera:

$$H(s) = \frac{21.52}{2.18s + 1}$$

## Conclusiones Parciales II

---

1. El electroimán posee una histéresis propia de los materiales magnéticamente blandos, donde la diferencia es de 3 G (gauss).
2. Los modelos a régimen estacionario del electroimán permiten conocer el rango de linealidad del sistema, que se encuentra aproximadamente hasta los 540 mV que son aproximadamente 54 A, lo que permite establecer la dinámica del sistema dentro del rango lineal, con una ganancia de 23.7.
3. Los valores de la inductancia y de la permeabilidad magnética relativa aparente del electroimán, corresponden a distintos puntos de operación, se obtienen por métodos numéricos mediante el programa Comsol Multiphysics v. 5.0, utilizando una aproximación de la curva de histéresis a una línea recta.
4. Se diseña y programa una interfaz gráfica en LabVIEW 6i que permite de forma precisa seleccionar los canales de entrada salida, así como la ganancia requerida para el experimento, de acuerdo a los registros de la tarjeta PCL-711B.
5. El modelo analítico del electroimán es de primer orden con una ganancia de 20.8.
6. Analizando independientemente el escalón de subida y de bajada para diferentes estructuras ARX con los datos medidos del experimento 3, se propone utilizar el de primer orden que coincide con el analítico, demostrando gráficamente que hay estructuras ARX que aunque son de orden superior tiene un buen ajuste, y que los modelos obtenidos son aproximadamente iguales tanto para la subida como para la bajada, señalando que se puede considerar también un modelo único.
7. Se obtienen varias estructuras ARX para el Experimento 1, proponiendo un ARX que es el arx4 con el mejor ajuste de 85.79% y los datos para validar se obtuvieron del Experimento 3, proponiendo un modelo de primer orden ARMAX que es el armax1 con un ajuste de un 85.42%, los cuales mostraron los residuos más bajos.
8. Se obtienen tres modelos experimentales de primer orden para el electroimán Bruker BE-38, los cuales son dos ARX para estimación y el ARMAX para validación, que coinciden con el modelo analítico de primer orden, donde se promedian las ganancias y la constante de tiempo para proponer un modelo único, que en la práctica también es posible considerar.



*" El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente  
un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento,  
porque precisamente es lo que más estamos sembrando,  
lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia".*

*Fidel Castro Ruz*

## *Conclusiones Generales*

## CONCLUSIONES GENERALES

---

1. La histéresis del electroimán se obtiene a través de las mediciones por el método de Efecto Hall, se observó gráficamente una histéresis estrecha, propia de los materiales magnéticamente blandos, donde la diferencia del campo inicial y el remanente es de 3 G.
2. Los modelos a régimen estacionario del electroimán, permiten conocer el rango de linealidad del sistema, que se encuentra aproximadamente hasta los 540 mV que son aproximadamente 54 A, lo que permite establecer la dinámica del sistema dentro del rango lineal, con una ganancia de 23.74.
3. Los valores de la inductancia y de la permeabilidad magnética relativa aparente del electroimán, que corresponden a distintos puntos de operación se obtienen por métodos numéricos y están entre un 2% a un 5% de error con respecto al valor real.
4. El modelo analítico del electroimán Bruker BE-38 es de primer orden con una ganancia de 20.8.
5. Analizando independientemente el escalón de subida y de bajada, se demuestra que hay estructuras ARX que son aproximadamente iguales en los modelos obtenidos, tanto para la subida como para la bajada, observando gráficamente que hay modelos que no son de primer orden y sin embargo se observa un buen ajuste, señalando para este tipo de experimento que se propone un modelo único tanto para la subida como para la bajada, porque son aproximadamente iguales.
6. Los datos utilizados para estimar el modelo experimental del electroimán se obtienen después de ensayar con varias estructuras ARX para el Experimento 1, proponiendo el arx4 con el mejor ajuste de un 85.79% y los datos para validar se obtienen del Experimento 3, proponiendo un modelo de primer orden armax1 con un ajuste de un 85.42%, los cuales mostraron los residuos más bajos.
7. Se obtienen tres modelos experimentales de primer orden para el electroimán Bruker BE-38, los cuales son dos ARX para estimación (para promediar se escogió un solo modelo ARX) y el ARMAX para validación, que coinciden con el modelo analítico, donde se promediaron las ganancias y la constante de tiempo para proponer un modelo único.
8. Las potencialidades del resultado en el campo económico son evidentes a partir de la obtención de productos, e investigaciones más competitivos; un servicio derivado de un sistema magnético como el antes mencionado solo es privativo de países altamente desarrollados, de elevado costo y de difícil adquisición por países en vías de desarrollo.
9. Aumenta la prestación de los servicios científico-técnico, en caracterización de materiales magnéticos y sensores, a instituciones científicas del país y del área de Latinoamérica.
10. Los resultados redundan de manera directa en la calidad de vida de los seres humanos, debido a que se mejora el conocimiento cuantitativo de los sistemas generadores de campos magnéticos vinculados a la industria médica, donde la eficacia de una terapia puede, no solo, influir la intensidad del campo magnético aplicado, sino también la homogeneidad, gradiente y otros parámetros importantes de los campos magnéticos.



*" El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente  
un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento,  
porque precisamente es lo que más estamos sembrando,  
lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia".*

*Fidel Castro Ruz*

## *Recomendaciones*

## RECOMENDACIONES

---

1. Se recomienda en la práctica evaluar cada uno de los modelos obtenidos, utilizando un punto de operación planificado para un determinado experimento, considerando los de primer orden por la similitud que tienen los resultados obtenidos, pero en el instante de implementar el lazo de control se debe evaluar cuál de ellos en la práctica es el más preciso para controlar el electroimán Bruker BE-38.
2. Con los resultados obtenidos en este trabajo se debe hacer la implementación práctica y lograr con ello un mejor desempeño del sistema.
3. Considerar hacer nuevas mediciones entrada-salida desde diferentes puntos de operación del electroimán, donde se tomen más de tres experimentos, y se pueda excitar el sistema con la misma señal escalón u otra, que permita recoger la dinámica del sistema, tomando dependiendo del sistema de adquisición de datos un adecuado tiempo de muestreo, a partir de la entrada del sistema que es la fuente estabilizada Bruker B-HS 90.
4. Consultar este material en futuros trabajos investigativos que se deriven alrededor de esta instalación del laboratorio de magnetismo de la Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba.





*" El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente  
un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento,  
porque precisamente es lo que más estamos sembrando,  
lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia".*

*Fidel Castro Ruz*

# *Bibliografía*

## BIBLIOGRAFÍA

---

1. Alberteris M. "et al" Secuenciador de Eventos para Escáner de Resonancia Magnética". Revista Española de Electrónica. España. No. 579. Febrero 2003.
2. Arafet P., Chang F., Domínguez H., Torres M., & León E. (2004). Monografía sobre identificación de sistemas. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
3. Arjón A. A., Mandujano E. N. Modelado matemático y control para levitación magnética. Universidad Autónoma de Zacatecas de Ingeniería Eléctrica, 2007.
4. Åström, K., & Bohlin, T. (1965). Numerical Identification of linear dynamics systems from normal operating records. IFAC Symposium on Self-Adaptive Systems. Teddington, England.
5. Deás, D. "et al". Evaluación de los niveles de Campo Magnético Irradiados en Estimuladores Magnéticos Empleando MEF- 2D. Artículo publicado en FIE 2014.
6. DM044\_MAD-XR\_spanish.pdf. Sistema para Detección de Anomalías Magnéticas con Funciones Ampliadas.
7. Entrevista al profesor D.C. Alejandro Bordelois Cayamo, Prof. Consultante, Centro de Biofísica Médica, Universidad de Oriente, 2015.
8. Entrevista al profesor D.C. Fidel Guilart González, Prof. Consultante, Dpto. de Campos Magnéticos, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente, fgilart@cnea.uo.edu.cu, 2015.
9. Entrevista al profesor MSc. Alcibíades Lara Lafargue, Prof. Asistente, Dpto. de Campos Magnéticos, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente, lara@cnea.uo.edu.cu, 2015.
10. Eykhoff P. System Identification. Parameter and state estimation. London: John Wiley, 1974.
11. García E. Métodos Experimentales del magnetismo. Colectivo de autores, 1978.
12. Gilart F. Apuntes: Electromagnetismo enfocado al diseño y la explotación de dispositivos electromecánicos y generadores de campo magnético, 2015.
13. Gilart F. Conferencia 1: Electromagnetismo Básico enfocado hacia las ciencias médico-biológicas, 2015.
14. Gilart F. Conferencia 2: Los materiales magnéticos y sus características, 2015.
15. Gilart F. Conferencia 3: Caracterización magnética de materiales y de dispositivos generadores de campo magnético, 2015.
16. Halliday, D., Robert R. Física para estudiantes de ciencias e ingeniería. Segunda Edición Revisada, Corregida y aumentada. Parte 2. Edición Revolucionaria, 1975.
17. Ho, B., & Kalman, R. (1965). Effective construction of linear state-variable models from input-output functions
18. J.M. de la Cruz. ISA-UCM. Descripción de la Tarjeta De Adquisición de Datos PC-Labcard 711. Facultad de Informática, Control Digital, Jesús Manuel de la Cruz García.
19. Ljung, L: System Identification: Theory for the User. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1987.
20. López O. Diseño de un Programador de Pulsos para un Magnetómetro de Resonancia Magnética Nuclear. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Control Automático. Santiago de Cuba 2009.

21. Maloof E. User's Manual Model 475 DSP Gaussmeter. 2004.
22. Martínez V., J. C. Cincuenta años de resonancia magnética nuclear. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 21(80): 335-345, 1997. ISSN 0370-3908.
23. Matveev A.N, Electricidad y Magnetismo. Editorial Mir.1978.
24. Milena J. C. Control Lineal y No Lineal de un Levitador Magnético. Estudio Comparativo. Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Telecomunicaciones. Tesis de diploma, Barcelona 2010.
25. Núñez, J. R. "et al". Efectos del Tratamiento Magnético en Calderas de Baja Presión del Sistema de Salud de Santiago de Cuba. Tecnología Química, Vol. XXI, No. 3, 2001. ISSN 1890-5425-1-PB.
26. Ogata, K. Ingeniería de Control Moderna. Ediciones Castilla, Tomos 1 y 2, S.A, Madrid, 1980.
27. Ramírez M. Identificación de Sistemas (Apuntes para una monografía). Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automática. Santiago de Cuba 2014.
28. Reyes S. L., Rabilero M. Electricidad y Magnetismo. Editorial Pueblo y Educación. ISPJAE 1986.
29. Ricardo B. T. Caracterización Física del Laboratorio de Campo Bajos. Trabajo de Diploma, Universidad de Oriente, Facultad de Ciencias Naturales, Departamento de Física. Santiago de Cuba 2008.
30. Rodríguez, J. Sistemas Electromecánicos. Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Electrónica, Valparaíso-Chile, Agosto de 1999.
31. Söderström, T. y Stoica, P. System Identification. Prentice Hall. 1989.
32. Zadeh L. From circuit theory to system theory. In Proc. IRE 50, 1962.
33. Zhu, Y. Multivariable System Identification for Process Control. Elsevier Science & Technology Books. 2001.
34. <http://biojess.blogspot.com/2008/12/espectroscopa-de-rmn-de-pulsos-y.html>
35. <http://bueno-saber.com/aficiones-juegos-y-juguetes/ciencia-y-naturaleza/acerca-de-electroimanes.php>
36. [http://centrodeartigo.com/articulos-enciclopedicos/article\\_88357.html](http://centrodeartigo.com/articulos-enciclopedicos/article_88357.html)
37. <http://centrodeartigo.com/revista-digital-educacion-tecnologia-educativa/contenido-16361.html>
38. [http://ecuacioneuropa.eu/health/scientific\\_committees/opinions\\_layman/es/campos-electromagneticos07/index.htm](http://ecuacioneuropa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/campos-electromagneticos07/index.htm)
39. <http://electroimn.blogspot.com/>
40. <http://electrokadpd-cetis.blogspot.com/2011/11/que-es-un-electroiman-e-historia.html>
41. [http://fisica.udea.edu.co/~lab-gicm/Instrumentacion/2014\\_levitador%20magnetico.pdf](http://fisica.udea.edu.co/~lab-gicm/Instrumentacion/2014_levitador%20magnetico.pdf)
42. <http://fiuady-lab2.blogspot.com/2010/02/bobina-de-helmholtz.html>
43. [http://personal.us.es/boix/uploads/pdf/tecnicas\\_electrodinamica/helmholtz\\_prot.pdf](http://personal.us.es/boix/uploads/pdf/tecnicas_electrodinamica/helmholtz_prot.pdf)
44. <http://www.bruker.com/es/products/mr/nmr/magnets/magnets.html>
45. <http://www.librosmaravillosos.com/tresmilenariosdeliman/capitulo06.html>
46. [http://www.uco.es/grupos/1.4\\_Flujo\\_magnetico](http://www.uco.es/grupos/1.4_Flujo_magnetico)
47. [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/2056/catalogo\\_separacion.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2056/catalogo_separacion.pdf)



*" El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente  
un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento,  
porque precisamente es lo que más estamos sembrando,  
lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia".*

*Fidel Castro Ruz*

*Anexos*

## ANEXOS

### Anexo 1. Aplicaciones de los electroimanes



Tren de levitación magnética.



Levantamiento de cargas de  
acero.



Alzamiento de latas de  
acero.



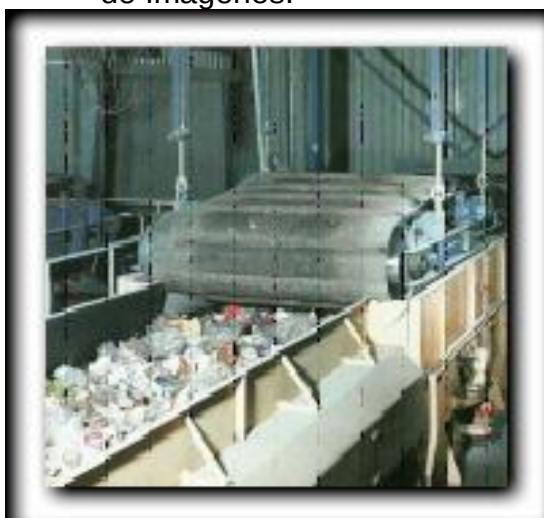
Instalación de Resonancia Magnética  
de Imágenes.



Pulpo manipulador de chatarra.



Filtro magnético.

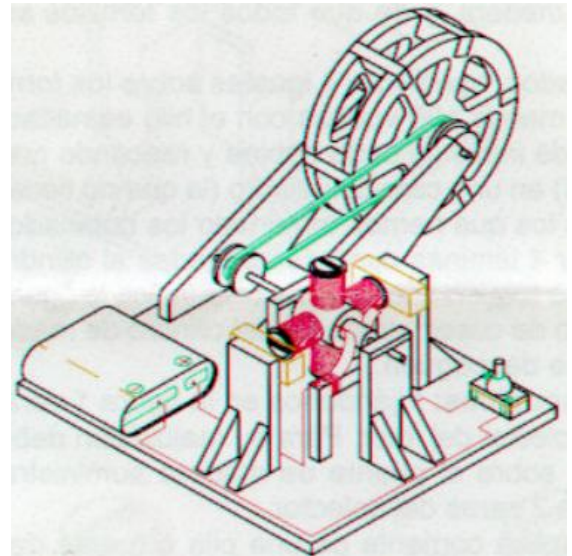
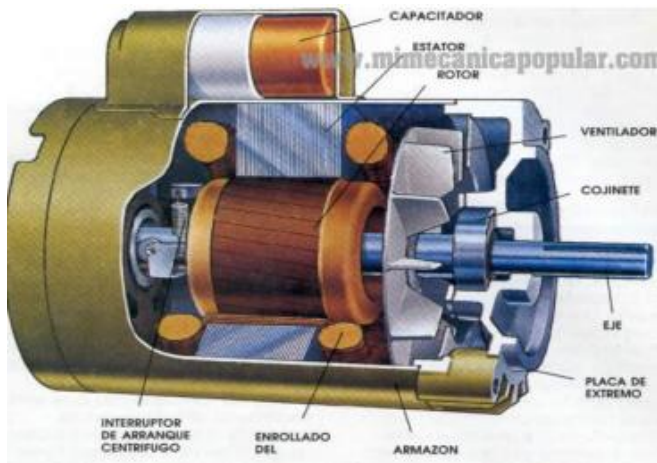


Sistema de banda para detectar residuos.



Banda magnética.

## Anexo 1. Aplicaciones de los electroimanes (continuación)

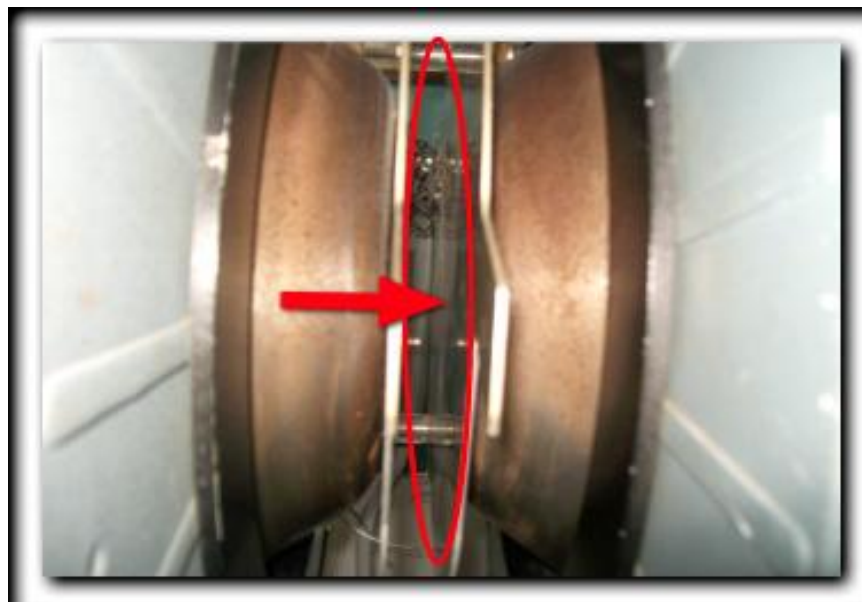


Motores eléctricos

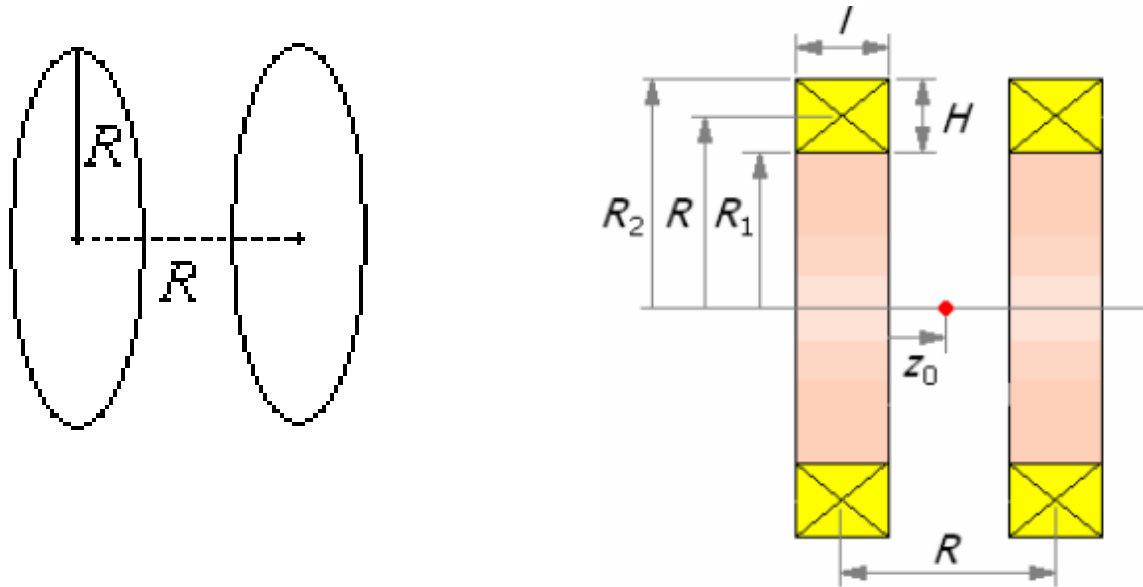
**Anexo 2. Vista lateral del electroimán Bruker BE-38**



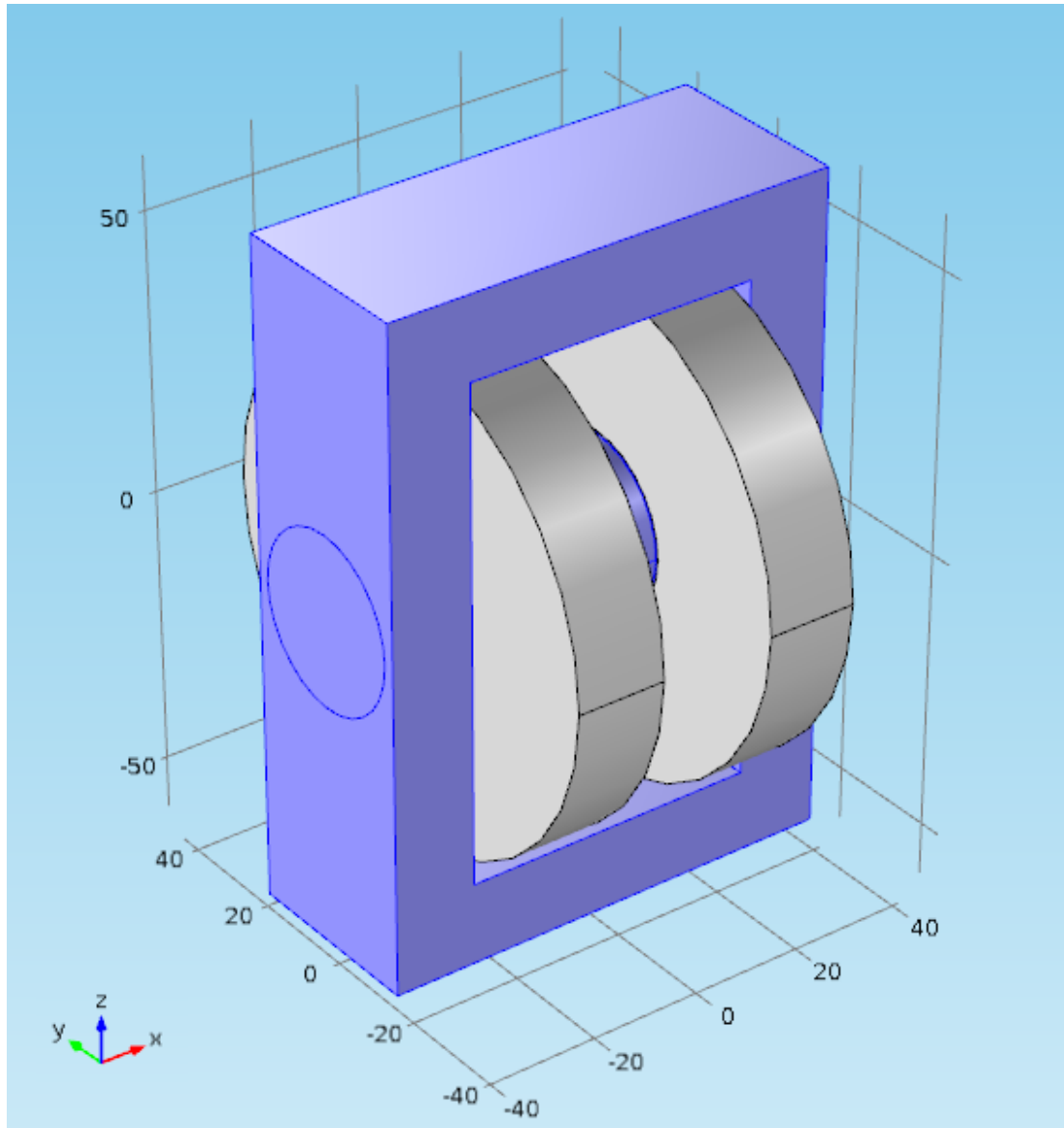
**Anexo 3. Gap de aire del electroimán para colocar los sensores**



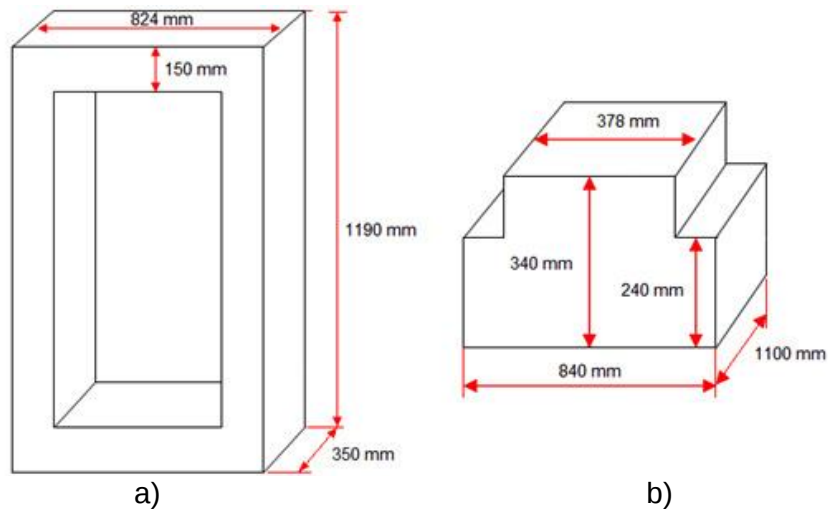
#### Anexo 4. Pares de bobinas Helmholtz



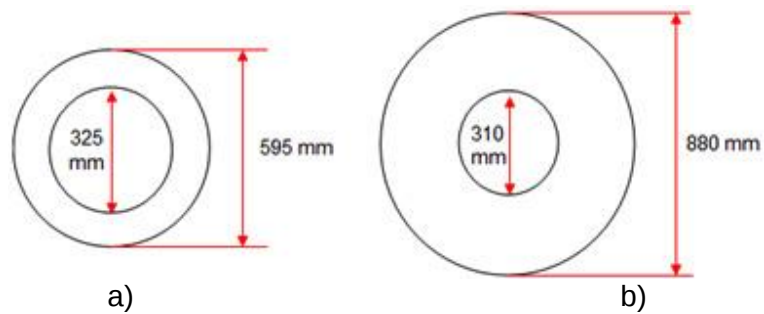
## Anexo 5. Modelo 3D del electroimán Bruker BE-38 construido en el programa Comsol Multiphysics



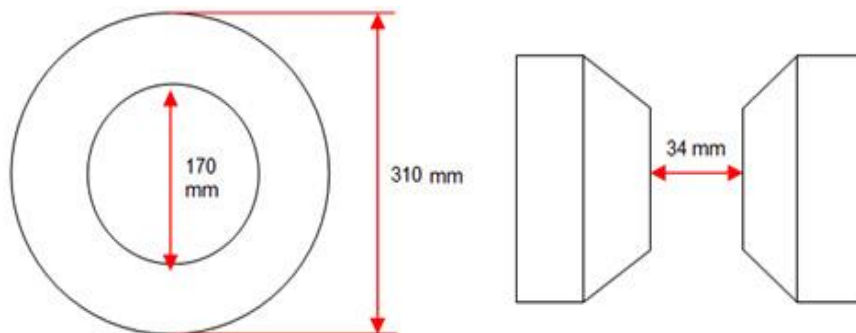
**Anexo 6. Dimensiones exteriores del electroimán Bruker BE-38. a) Yugo, b) Base**



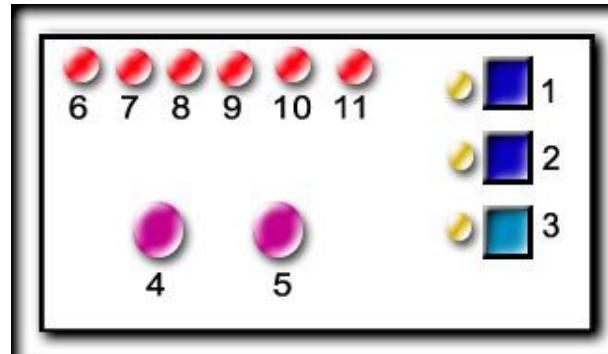
**Anexo 7. Dimensiones de las bobinas Helmholtz del electroimán Bruker BE-38. a) Bobina Compensadora, b) Bobina Generadora**



**Anexo 8. Dimensiones de los polos del electroimán. a) Polos vista frontal, b) Polos vista lateral**



## Anexo 9. Panel de operación manual de la fuente B – HS 90



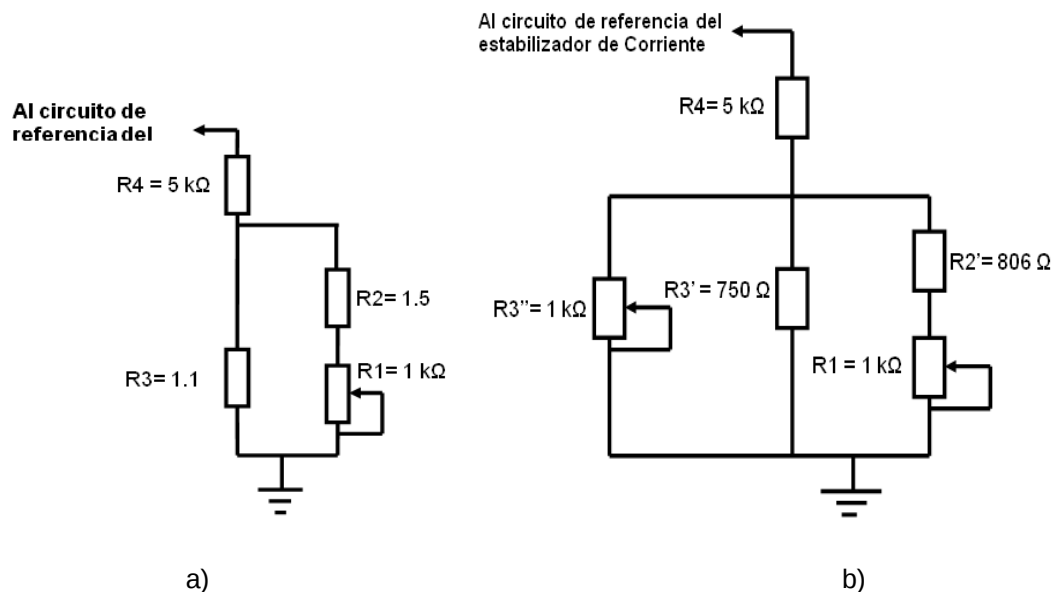
| Opciones posibles a realizar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 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. <b>Modificación Implementada).</b> Ajuste grueso de 1 k $\Omega$ .                              |
| 5. Potenciómetros variables                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Se establece un valor fino de corriente de salida para la fuente. <b>(Modificación Implementada).</b> Ajuste fino de 1 k $\Omega$ .                                 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Potenciómetros en el mínimo. V = 1.4894 mV</li> <li>Potenciómetros en el máximo V = 639.840 mV</li> <li>Se puede medir mediante un Multímetro digital.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                     |
| <p>Los siguientes LED's pilotos indican una condición de fallo, cuando se encuentran encendidos.</p> <p>6. Sobrecarga de Corriente, Corriente Máxima insuficiente para alcanzar el valor establecido.</p> <p>7. Relación trifásica inapropiada o existe una fase caída.</p> <p>8. Intercambiador de calor trabaja incorrectamente, chequear el nivel de agua.</p> <p>9. Transistor PS, donde la salida principal del transistor PS registra un nivel de temperatura muy alto, debido a flujo insuficiente de agua fría.</p> <p>10. Nivel de salida de corriente en los shim registra muy alta temperatura.</p> <p>11. Alta Temperatura (<math>\approx 60\text{ }^{\circ}\text{C}</math>) en las bobinas del electroimán.</p> |                                                                                                                                                                     |

## Anexo 10. Modificación realizada en la fuente del electroimán

Este es un circuito divisor de tensión eléctrica que se encuentra a la entrada del circuito de referencia de la fuente estabilizada de corriente del electroimán, este divisor tiene un ajuste fino de corriente, que le permite variar el campo magnético en un rango muy pequeño, el valor máximo de resistencia que se puede ajustar en la porción inferior del divisor es de 0.76 kΩ y la mínima de 0.63 kΩ, esta diferencia es solo de 0.13 kΩ, figura 1 a).

La ecuación empleada para calcular la resistencia total del circuito en paralelo fue:

$$R_T = \frac{R_3 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3} + R_4 \quad (1)$$



**Figura 1.** Circuito de la fuente. a) Circuito divisor de tensión eléctrica sin modificar. b) Modificación del circuito de referencia de la fuente.

A la fuente del electroimán se le hizo una modificación que se muestra en el inciso 1 b). Se sustituye a R3 por R3' y R3'' en paralelo, siendo R3'' un potenciómetro de 1 kΩ y se cambió a R2 por R2', lográndose con esta modificación lo siguiente:

1. Existe una protección para el caso en que  $R3'' = \infty$ , que es R3'.
2. Que el valor mínimo del divisor llegue a 0 Ω, que resultaría cuando R3'' tenga su valor mínimo.
3. Que la variación tenga un ajuste fino de corriente (el potenciómetro que viene por diseño R1) y un ajuste grueso que sería el que se le agregó R3''

De esta forma el valor máximo de resistencia sería de 0.346 kΩ, que se obtendría cuando los dos controles estuvieran al máximo, uno intermedio que sería cuando el fino estuviera al mínimo y el grueso al máximo que sería de 0.28 kΩ, figura 2.6.

La ecuación empleada para calcular la resistencia total del circuito en paralelo fue:

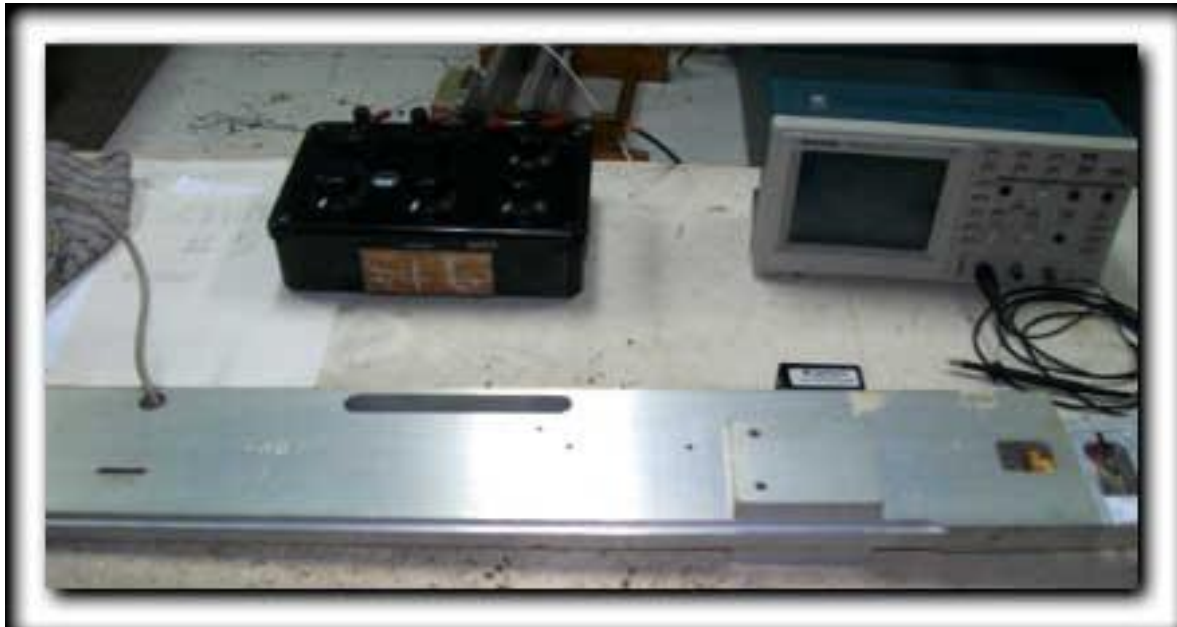
$$R_1 + R'_2 \quad (2)$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1 + R'_2} + \frac{1}{R'_3} + \frac{1}{R''_3} \quad (3)$$

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1 + R'_2} + \frac{1}{R'_3} + \frac{1}{R''_3}} \quad (4)$$

Siempre que  $R'_3 = 0$  cortocircuita todas las resistencias que están en paralelo con el, por tanto la corriente es mínima, y la inducción magnética es mínima también.

**Anexo 11. Sensor de Resonancia Magnética Nuclear y brazo para colocar la muestra**



**Anexo 12. Cabezal porta muestras**



### Anexo 13. Combinaciones de muestras con su valor de campo y de frecuencia

| #  | Voltaje Shunt (mV) | Frecuencia (MHz) | Campo Magnético (G) | Combinación | Isótopo          | Temperatura (°C) |
|----|--------------------|------------------|---------------------|-------------|------------------|------------------|
| 1  | 72.454             | 8.998860         | 2113.8              | 11          | H <sup>1</sup>   | 21.0             |
| 2  | 78.981             | 9.947540         | 2336.7              | 11          | H <sup>1</sup>   | 23.0             |
| 3  | 80.127             | 9.960770         | 2339.8              | 11          | H <sup>1</sup>   | 22.5             |
| 4  | 83.461             | 10.499920        | 2466.4              | 11          | H <sup>1</sup>   | 21.5             |
| 5  | 88.826             | 11.003150        | 2584.6              | 11          | H <sup>1</sup>   | 21.0             |
| 6  | 92.464             | 11.500841        | 2701.5              | 11          | H <sup>1</sup>   | 22.5             |
| 7  | 95.720             | 11.888320        | 2792.6              | 11          | H <sup>1</sup>   | 23.0             |
| 8  | 96.463             | 11.998190        | 2818.4              | 11          | H <sup>1</sup>   | 23.5             |
| 9  | 125.108            | 15.499300        | 3640.8              | 13          | H <sup>1</sup>   | 23.0             |
| 10 | 129.604            | 15.999130        | 3758.2              | 13          | H <sup>1</sup>   | 22.0             |
| 11 | 133.698            | 16.499430        | 3875.7              | 13          | H <sup>1</sup>   | 22.0             |
| 12 | 137.198            | 16.999111        | 3993.1              | 13          | H <sup>1</sup>   | 22.5             |
| 13 | 141.693            | 17.499730        | 4110.7              | 13          | H <sup>1</sup>   | 22.5             |
| 14 | 145.900            | 17.998420        | 4227.8              | 13          | H <sup>1</sup>   | 22.5             |
| 15 | 186.530            | 9.001230         | 5440.6              | 11          | Li <sup>7</sup>  | 23.0             |
| 16 | 206.210            | 9.961566         | 6021.0              | 11          | Li <sup>7</sup>  | 23.5             |
| 17 | 207.419            | 9.962438         | 6021.5              | 11          | Li <sup>7</sup>  | 22.0             |
| 18 | 218.008            | 10.497850        | 6345.1              | 11          | Li <sup>7</sup>  | 25.0             |
| 19 | 229.301            | 11.000080        | 6648.7              | 11          | Li <sup>7</sup>  | 22.0             |
| 20 | 239.121            | 11.555730        | 6984.6              | 11          | Li <sup>7</sup>  | 27.0             |
| 27 | 279.854            | 8.999900         | 8113.1              | 11          | Al <sup>27</sup> | 23.0             |
| 28 | 310.588            | 9.957406         | 8976.3              | 11          | Al <sup>27</sup> | 24.0             |
| 29 | 308.972            | 9.957530         | 8976.4              | 11          | Al <sup>27</sup> | 24.5             |
| 21 | 321.870            | 15.499617        | 9368.3              | 13          | Li <sup>7</sup>  | 22.5             |
| 30 | 324.538            | 10.499950        | 9465.4              | 11          | Al <sup>27</sup> | 25.5             |
| 22 | 333.869            | 16.000000        | 9670.8              | 13          | Li <sup>7</sup>  | 23.0             |
| 31 | 341.392            | 10.999780        | 9915.9              | 11          | Al <sup>27</sup> | 24.0             |
| 23 | 345.184            | 16.498420        | 9972.0              | 13          | Li <sup>7</sup>  | 25.0             |
| 24 | 356.304            | 17.000330        | 10275.4             | 13          | Li <sup>7</sup>  | 25.5             |
| 32 | 358.206            | 11.558570        | 10419.7             | 11          | Al <sup>27</sup> | 28.5             |
| 25 | 364.948            | 17.499600        | 10577.2             | 13          | Li <sup>7</sup>  | 25.5             |
| 26 | 377.116            | 18.000600        | 10880.0             | 13          | Li <sup>7</sup>  | 25.5             |
| 39 | 480.994            | 8.999497         | 13771.4             | 11          | D <sup>2</sup>   | 24.0             |
| 33 | 488.584            | 15.500360        | 13973.1             | 13          | Al <sup>27</sup> | 27.0             |
| 34 | 505.658            | 16.000306        | 14423.8             | 13          | Al <sup>27</sup> | 27.0             |
| 35 | 522.691            | 16.500220        | 14874.4             | 13          | Al <sup>27</sup> | 27.0             |
| 40 | 535.361            | 9.956649         | 15236.1             | 11          | D <sup>2</sup>   | 29.0             |
| 36 | 539.950            | 17.000780        | 15325.7             | 13          | Al <sup>27</sup> | 27.5             |
| 37 | 557.542            | 17.500030        | 15775.7             | 13          | Al <sup>27</sup> | 27.5             |
| 41 | 564.820            | 10.498420        | 16065.1             | 11          | D <sup>2</sup>   | 25.0             |
| 38 | 575.725            | 18.000210        | 16226.6             | 13          | Al <sup>27</sup> | 27.5             |
| 42 | 601.209            | 11.000150        | 16832.9             | 11          | D <sup>2</sup>   | 28.0             |
| 43 | 639.554            | 11.557370        | 17685.6             | 11          | D <sup>2</sup>   | 28.0             |

**Anexo 14. Brazos y sus cabezales para distintas combinaciones de muestras**

| Brazo<br>( MHz )                   | Cabezal<br>(PK-Z12V)<br>(MHz) | Cajas<br>Sintonía<br>(MHz) | Campo<br>H <sup>1</sup><br>(Gauss) | Campo<br>Li <sup>7</sup><br>(Gauss) | Campo<br>Al <sup>27</sup><br>(Gauss) | Campo<br>D <sup>2</sup><br>(Gauss) | Combinación |
|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------|
| 4 -<br>20(Z22v-<br>GA)             | 4 - 7[F]                      | 4 - 7                      | 939 - 1644                         | 2418 - 4231                         | 3606 - 6310                          | 6121 -<br>10712                    | 1           |
|                                    | 7 - 12<br>[F]                 | 7 - 12                     | NO SINTONIZA                       |                                     |                                      |                                    | 2           |
|                                    | 12 - 20(18)<br>[F]            | 12 - 20<br>(16,5)          | 2818 - 4697                        | 7253 - 12088                        | 10818 -<br>18029(16226)              | 18363 - -<br>(25249)               | 3           |
| 20 - 100<br>(Z22v-GB)              | 20-32<br>(FALTA)              |                            |                                    |                                     |                                      |                                    | 4           |
|                                    | 32 - 45<br>[F]                | 32 - 45                    |                                    |                                     |                                      |                                    | 5           |
|                                    | 45 - 70<br>[F]                | 45 - 55                    |                                    |                                     |                                      |                                    | 6           |
|                                    |                               | 55 - 70                    |                                    |                                     |                                      |                                    | 7           |
|                                    | 70 - 90<br>[F]                | 70 - 85                    |                                    |                                     |                                      |                                    | 8           |
|                                    |                               | 85 - 90                    |                                    |                                     |                                      |                                    | 9           |
| Todo el<br>Rango<br>(Z22 WB-<br>A) | 4,5 - 10(12)<br>[MN]          | 4 - 7                      |                                    |                                     |                                      |                                    | 10          |
|                                    |                               | 7(7,5) -<br>12             | 1762 - 2818                        | 4543 - 7253                         | 6761 - 10818                         | 11477 -<br>18363                   | 11          |
|                                    | 10-18<br>(FALTA)              |                            |                                    |                                     |                                      |                                    | 12          |
|                                    | 18(14,5) -<br>37[MN]          | 12 - 20(32                 | 3406 -<br>4697(7516)               | 8764 -<br>12087(19342)              | 13071- 18028 ( -<br>)                | -                                  | 13          |
|                                    |                               | 20 - 32                    |                                    |                                     |                                      |                                    | 14          |
|                                    | 38 - 80<br>(FALTA)            |                            |                                    |                                     |                                      |                                    | 15          |
|                                    | 80 - 90<br>[MN]               | 70 - 85                    |                                    |                                     |                                      |                                    | 16          |
|                                    |                               | 85 - 90                    |                                    |                                     |                                      |                                    | 17          |

## Anexo 15. Método de medición por Resonancia Magnética Nuclear de Pulsos (RMNP)

1. Se definen en el generador los valores de amplitud y frecuencia que conformaran el pulso de radio frecuencia.
2. Se sintoniza el cabezal del sensor en la frecuencia de trabajo.
3. Se ajustan los parámetros del magnetómetro.
4. Establecer un valor próximo al que se desea utilizar para la transmisión, siguiendo las instrucciones dadas en el Manual de Usuario para la Generación de Campo Magnético.
5. Conocido el valor de campo magnético que se utilizara para la transmisión.
6. Se coloca el transductor dentro del campo magnético.
7. Se sintoniza el sensor a la frecuencia de resonancia de dicho Núcleo, dicha frecuencia se determina por medio de la ecuación de Larmor (para la razón giromagnética del Núcleo y el valor dado de inducción magnética, existe un valor único de frecuencia de resonancia).
8. En este paso ya es posible observar la señal de la SIL, en el osciloscopio en el dominio del tiempo, si no se observa se puede realizar un pequeño ajuste con el potenciómetro fino de la fuente.
9. Se ajustan los siguientes parámetros del PICMAG:
  - **Modulo ME-105.**
    - Filtro de ruido, hasta obtener una buena relación Señal Ruido.
    - Amplificación, al máximo.
    - Ganancia, hasta que la señal aumente sin saturarse.
    - Ancho del pulso P1, cerrado.
    - Ancho del pulso P2, obtener máxima amplitud, con ancho mínimo.
    - Tiempo de Repetición, que no exista saturación.
    - Separación de los pulsos, en 2 ms.
  - **Generador de Frecuencia.**
    - Frecuencia de resonancia del Núcleo en ese campo magnético.
    - Amplitud del tono, en 7 dBm.
  - **Osciloscopio.**
    - En el Dominio del Tiempo, dominio del tiempo.
  - **Resolución en la Amplitud de la Señal.**
  - **Resolución en el ancho de la señal, por general en Valor de División = 2,5 ms**
  - En el Dominio de la Frecuencia, dominio de la frecuencia.
  - **Se ajusta que el número de premeditaciones, 4 para medir campo magnético y mayor o iguala 16 para medir inhomogeneidad.**
1. Una vez que por el ajuste fino se obtiene la SIL, en el dominio del tiempo, se pasa entonces el osciloscopio al modo de medición de la FFT (al dominio de la frecuencia).
2. Se aumenta el valor de frecuencia entre 1 kHz y 3 kHz.
3. Se observa la señal en la ventana Hanning que es la de resolución óptima para medir frecuencia, y se determina el valor real de ese corrimiento, utilizando la opción de medir delta.
4. Por último se emplea la siguiente expresión, obtenida de la ecuación de Larmor, para estimar de forma indirecta el valor de la inducción magnética:

$$B = \frac{F_{\text{Leída}} - F_{\text{Corrimiento}}}{\gamma_P}$$

$F_{\text{Leída}}$  = Frecuencia leída en el generador o frecuencímetro,

$F_{\text{Corrimiento}}$  = Corrimiento de la Frecuencia de resonancia, leído en la opción Delta de osciloscopio.

$\gamma_P$  = Razón giromagnética entre PI, del núcleo empleado por el transductor.

Después que se obtiene la Señal de Inducción Libre (SIL), que es en el momento de resonancia, se pueden conocer los diferentes valores que describe el fenómeno físico a partir de la serie seleccionada a través del programador de pulsos.

### Valores relativos de $T_1$ , $T_2$ y $T_2^*$

Los valores de  $T_1$  varían mucho con los valores del campo magnético, ya que si aumentamos el valor de  $B_0$ , aumenta la frecuencia de las transiciones energéticas, mientras que las frecuencias internas de los movimientos moleculares no varían. Los valores de  $T_2$  son pocos sensibles al cambio del campo magnético, en consecuencia, cuando se den valores de  $T_1$  o de  $T_2$  debe indicarse el valor del campo magnético en que han sido calculados.

Fijado el campo magnético para un tejido biológico determinado, el valor de  $T_2$  es menor que el valor de  $T_1$ . En los líquidos puros, el  $T_2$  tiende a valores del  $T_1$ .

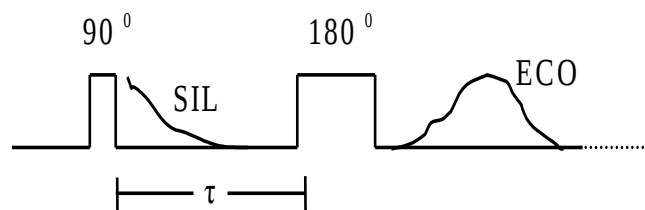
Para un mismo valor del campo magnético externo, los valores de  $T_2^*$  son siempre inferiores a los de  $T_2$ , indicando que el desfaseamiento es mucho más rápido.

En un campo perfectamente homogéneo el tiempo constante del decaimiento de la señal puede ser  $T_2$ , pero la señal de inducción libre decae en un tiempo  $T_2^*$  que es determinado principalmente por la inhomogeneidad del campo, el núcleo en diferentes partes del campo precesa a frecuencias escasamente diferentes, lo que provoca que se vayan de fases con respecto a las otros. Así la señal decae en un tiempo característico  $T_2^*$ ,

### Secuencias de pulsos

Para medir los parámetros de tiempo  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_2^*$  descritos anteriormente a partir de la señal de relajación, se excita la muestra a estudiar con una secuencia de pulsos de duración ( $T_p$ ), que depende del ángulo de inclinación al que se

quiere desplazar el vector  $\vec{M}$ , ya sea  $90^\circ$  o  $180^\circ$ . Estos pulsos se separan convenientemente un tiempo definido por la variable  $\tau$  y se repite dicha secuencia al transcurrir un tiempo de repetición ( $T_r$ ). Estas series de pulsos están compuestas de dos o más pulsos de  $90^\circ$  y/o  $180^\circ$  en dependencia del parámetro que se quiera medir para una aplicación dada. Básicamente los valores del tiempo de relajación SPIN – SPIN ( $T_2$ ) se determinan con la serie  $90^\circ - \tau - 180^\circ$ . Mientras que los valores del tiempo de relajación SPIN – RETICULO ( $T_1$ ) se determinan empleando la serie  $180^\circ - \tau - 90^\circ$ . En la Figura se observan las señales de relajación obtenidas de la excitación de una serie  $90^\circ - \tau - 180^\circ$  en la que el SIL corresponde al pulso de  $90^\circ$  y la señal ECO corresponde al pulso de  $180^\circ$ .



**Figura 1. Serie  $90^\circ - \tau - 180^\circ$**

En cambio si aplicamos la serie  $180^\circ - \tau - 90^\circ$  aparecerá solamente un SIL correspondiente al pulso de  $90^\circ$  y valor nulo de señal en el espacio de tiempo correspondiente al pulso de  $180^\circ$ .

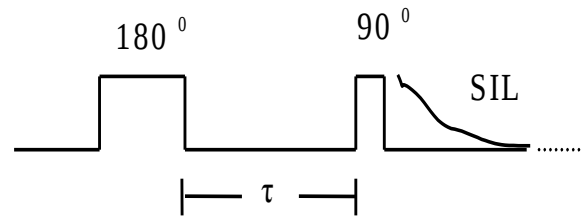


Figura 2. Serie 180°-τ- 90°

Aparte de las series básicas descritas anteriormente se utilizan las series Carr-Purcell, Carr-Purcell, 90-τ-90 y Saki-Bené entre otras.

El valor de las bases de tiempo involucradas en la conformación de estas secuencias de pulsos, es un punto de importancia en el diseño del Secuenciador de Eventos de un equipo por Resonancia Magnética Nuclear ya que de ahí depende la frecuencia máxima del reloj base del sistema para el valor mínimo del ancho del pulso y para tiempos de repetición de la serie que se extienden en algunos casos hasta los doce segundos, implica un aumento de recursos de memoria y líneas que contienen direcciones y datos.

Cuando la muestra y el sistema magnético no son idealmente homogéneos en el volumen de estudio, entonces la ecuación del modelo matemático de Larmor toma la siguiente forma:

$$W_0 \pm \Delta W = \gamma \cdot (B_0 \pm \Delta B)$$

Donde  $\Delta W$  representa las contribuciones de las diferentes frecuencias de precesión alrededor de  $W_0$  debido a la inhomogeneidad de la muestra y del campo magnético externo y  $\Delta B$  es la distribución de los campos magnéticos locales de la muestra, debido a que un grupo de espines precesan con una frecuencia angular  $W_0$  y otros lo harán con cierta frecuencia angular  $W$ , desfasada de  $W_0$ ; debido a la influencia de los campos locales que se establecen por la interacción entre los espines magnéticos de la muestra (espín-espín).

Anexo 16. Registro de mediciones por el método de RMNP régimen estático

|  |                 | REGISTRO DE CALIBRACIÓN<br>ELECTROIMAN EN EL DOMINIO DE LA<br>FRECUENCIA |                 |                        | RC - 19 - 15                    | Pág. 1 de 2 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|---------------------------------|-------------|
| Estudio de Estabilidad: Núcleo: H <sup>1</sup>                                    |                 |                                                                          |                 |                        |                                 |             |
| No                                                                                | Hora<br>(hh:mm) | Frecuencia<br><u>Corrimiento</u> (MHz)                                   | Tiempo<br>(min) | Campo Magnético<br>(T) | Tensión Eléctrica<br>Shunt (mV) | T (°C)      |
| 1                                                                                 | 12:30           | 2.96                                                                     | 5               | 0.2999931              | 102.1627                        | 20.997      |
| 2                                                                                 | 12:45           | 3.12                                                                     | 20              | 0.2999894              | 102.1614                        | 20.998      |
| 3                                                                                 | 13:00           | 3.20                                                                     | 35              | 0.2999875              | 102.1622                        | 21.012      |
| 4                                                                                 | 13:15           | 3.30                                                                     | 50              | 0.2999852              | 102.1618                        | 21.003      |
| 5                                                                                 | 13:30           | 3.32                                                                     | 65              | 0.2999847              | 102.1607                        | 21.012      |
| 6                                                                                 | 13:45           | 3.36                                                                     | 80              | 0.2999838              | 102.1617                        | 21.025      |
| 7                                                                                 | 14:00           | 3.40                                                                     | 95              | 0.2999828              | 102.1612                        | 20.998      |
| 8                                                                                 | 14:15           | 3.40                                                                     | 110             | 0.2999828              | 102.1613                        | 21.004      |
| 9                                                                                 | 14:30           | 3.50                                                                     | 125             | 0.2999805              | 102.1604                        | 21.032      |
| 10                                                                                | 14:45           | 3.54                                                                     | 140             | 0.2999795              | 102.1591                        | 20.980      |
| 11                                                                                | 15:00           | 3.46                                                                     | 155             | 0.2999814              | 102.1596                        | 21.014      |
| 12                                                                                | 15:15           | 3.04                                                                     | 170             | 0.2999795              | 102.1583                        | 20.994      |
| 13                                                                                | 15:30           | 3.04                                                                     | 185             | 0.2999795              | 102.1581                        | 20.999      |
| 14                                                                                | 15:45           | 2.98                                                                     | 200             | 0.2999809              | 102.1591                        | 21.012      |
| 15                                                                                | 16:00           | 2.96                                                                     | 215             | 0.2999814              | 102.1594                        | 21.104      |
| 16                                                                                | 16:15           | 2.86                                                                     | 230             | 0.2999838              | 102.1568                        | 21.001      |
| 17                                                                                | 16:30           | 2.86                                                                     | 245             | 0.2999838              | 102.1600                        | 20.974      |
| 18                                                                                | 16:45           | 2.86                                                                     | 260             | 0.2999838              | 102.1594                        | 21.024      |
| 19                                                                                | 17:00           | 2.84                                                                     | 275             | 0.2999842              | 102.1593                        | 20.987      |
| 20                                                                                | 17:15           | 2.78                                                                     | 290             | 0.2999856              | 102.1589                        | 20.994      |
| 21                                                                                | 17:30           | 2.68                                                                     | 305             | 0.2999880              | 102.1591                        | 21.001      |
| 22                                                                                | 17:45           | 2.42                                                                     | 320             | 0.2999941              | 102.1632                        | 20.966      |
| 23                                                                                | 18:00           | 2.36                                                                     | 335             | 0.2999955              | 102.1634                        | 21.015      |
| 24                                                                                | 18:15           | 2.48                                                                     | 350             | 0.2999927              | 102.1631                        | 21.022      |
| 25                                                                                | 18:30           | 2.56                                                                     | 365             | 0.2999908              | 102.1610                        | 20.994      |
| 26                                                                                | 18:45           | 2.60                                                                     | 380             | 0.2999899              | 102.1606                        | 21.070      |
| 27                                                                                | 19:00           | 2.62                                                                     | 395             | 0.2999894              | 102.1609                        | 21.089      |
| 28                                                                                | 19:15           | 2.56                                                                     | 410             | 0.2999908              | 102.1609                        | 20.984      |
| 29                                                                                | 19:30           | 2.44                                                                     | 425             | 0.2999936              | 102.1624                        | 21.018      |
| 30                                                                                | 19:45           | 2.54                                                                     | 440             | 0.2999913              | 102.1606                        | 21.010      |
| 31                                                                                | 20:00           | 2.42                                                                     | 455             | 0.2999941              | 102.1626                        | 20.991      |
| 32                                                                                | 20:15           | 2.54                                                                     | 470             | 0.2999913              | 102.1607                        | 21.011      |
| 33                                                                                | 20:30           | 2.48                                                                     | 485             | 0.2999927              | 102.1626                        | 21.159      |
| 34                                                                                | 20:45           | 3.06                                                                     | 500             | 0.2999908              | 102.1605                        | 21.040      |
| 35                                                                                | 21:00           | 2.98                                                                     | 515             | 0.2999927              | 102.1615                        | 21.036      |

|    |       |      |     |           |          |        |
|----|-------|------|-----|-----------|----------|--------|
| 36 | 21:15 | 3.00 | 530 | 0.2999922 | 102.1612 | 21.019 |
| 37 | 21:30 | 2.98 | 545 | 0.2999927 | 102.1617 | 21.116 |
| 38 | 21:45 | 2.98 | 560 | 0.2999927 | 102.1617 | 21.003 |
| 39 | 22:00 | 2.92 | 575 | 0.2999941 | 102.1625 | 21.040 |
| 40 | 22:15 | 2.96 | 590 | 0.2999931 | 102.1623 | 21.014 |
| 41 | 22:30 | 2.98 | 605 | 0.2999927 | 102.1620 | 21.108 |
| 42 | 22:45 | 2.96 | 620 | 0.2999931 | 102.1626 | 20.990 |
| 43 | 23:00 | 2.96 | 635 | 0.2999931 | 102.1623 | 21.034 |
| 44 | 23:15 | 2.96 | 650 | 0.2999931 | 102.1614 | 21.024 |
| 45 | 23:30 | 3.04 | 665 | 0.2999913 | 102.1612 | 21.064 |
| 46 | 23:45 | 3.02 | 680 | 0.2999917 | 102.1625 | 21.317 |
| 47 | 0:00  | 3.00 | 695 | 0.2999922 | 102.1619 | 21.031 |
| 48 | 0:15  | 2.92 | 710 | 0.2999941 | 102.1638 | 21.035 |
| 49 | 0:30  | 3.12 | 725 | 0.2999894 | 102.1618 | 21.022 |
| 50 | 0:45  | 3.06 | 740 | 0.2999908 | 102.1628 | 21.097 |
| 51 | 1:00  | 2.94 | 755 | 0.2999936 | 102.1645 | 20.996 |
| 52 | 1:15  | 3.12 | 770 | 0.2999894 | 102.1630 | 21.027 |
| 53 | 1:30  | 3.18 | 785 | 0.2999880 | 102.1627 | 21.010 |
| 54 | 1:45  | 3.22 | 800 | 0.2999870 | 102.1631 | 21.159 |
| 55 | 2:00  | 3.32 | 815 | 0.2999847 | 102.1615 | 21.049 |
| 56 | 2:10  | 3.26 | 825 | 0.2999861 | 102.1623 | 21.014 |
| 57 | 2:20  | 3.26 | 835 | 0.2999861 | 102.1631 | 21.024 |
| 58 | 2:30  | 3.28 | 845 | 0.2999856 | 102.1628 | 21.028 |
| 59 | 2:40  | 3.30 | 855 | 0.2999852 | 102.1634 | 21.142 |
| 60 | 2:50  | 3.34 | 865 | 0.2999842 | 102.1623 | 21.030 |
| 61 | 3:00  | 3.26 | 875 | 0.2999861 | 102.1635 | 21.040 |
| 62 | 3:10  | 3.42 | 885 | 0.2999823 | 102.1621 | 21.040 |
| 63 | 3:20  | 3.38 | 895 | 0.2999833 | 102.1628 | 21.020 |
| 64 | 3:30  | 3.40 | 905 | 0.2999828 | 102.1625 | 21.013 |
| 65 | 3:40  | 3.44 | 915 | 0.2999819 | 102.1632 | 21.093 |
| 66 | 3:50  | 3.42 | 925 | 0.2999823 | 102.1625 | 21.042 |
| 67 | 4:00  | 3.52 | 935 | 0.2999800 | 102.1622 | 21.022 |
| 68 | 4:10  | 3.48 | 945 | 0.2999809 | 102.1629 | 21.004 |
| 69 | 4:20  | 3.56 | 955 | 0.2999791 | 102.1615 | 21.038 |
| 70 | 4:30  | 3.50 | 965 | 0.2999805 | 102.1631 | 21.019 |
| 71 | 4:40  | 3.52 | 975 | 0.2999800 | 102.1626 | 21.128 |

Anexo 17. Registro de mediciones por el método de RMNP régimen estático

|  |                 | REGISTRO DE CALIBRACIÓN<br>ELECTROIMAN EN EL DOMINIO DE LA<br>FRECUENCIA |                 |                        | RC - 19 - 15                       | Pág. 1 de 1 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------------|-------------|
| Estudio de Estabilidad: Núcleo: : D <sup>2</sup>                                  |                 |                                                                          |                 |                        |                                    |             |
| No                                                                                | Hora<br>(hh:mm) | Frecuencia<br><u>Corrimiento</u> (MHz)                                   | Tiempo<br>(min) | Campo Magnético<br>(T) | Tensión Eléctrica<br>Shunt<br>(mV) | T (°C)      |
| 1                                                                                 | 11:00           | 1.50                                                                     | 0               | 1.1996934              | 416.240                            | 25.150      |
| 2                                                                                 | 11:15           | 1.48                                                                     | 15              | 1.1996964              | 416.237                            | 25.001      |
| 3                                                                                 | 11:30           | 1.50                                                                     | 30              | 1.1996934              | 416.237                            | 25.025      |
| 4                                                                                 | 11:45           | 1.48                                                                     | 45              | 1.1996964              | 416.236                            | 24.990      |
| 5                                                                                 | 12:00           | 1.50                                                                     | 60              | 1.1996934              | 416.235                            | 25.028      |
| 6                                                                                 | 12:15           | 1.52                                                                     | 75              | 1.1996903              | 416.235                            | 25.056      |
| 7                                                                                 | 12:30           | 1.52                                                                     | 90              | 1.1996903              | 416.234                            | 24.990      |
| 8                                                                                 | 12:45           | 1.52                                                                     | 105             | 1.1996903              | 416.234                            | 25.003      |
| 9                                                                                 | 13:00           | 1.52                                                                     | 120             | 1.1996903              | 416.233                            | 25.034      |
| 10                                                                                | 13:15           | 1.56                                                                     | 135             | 1.1996842              | 416.233                            | 25.004      |
| 11                                                                                | 13:30           | 1.56                                                                     | 150             | 1.1996842              | 416.233                            | 25.022      |
| 12                                                                                | 13:45           | 1.56                                                                     | 165             | 1.1996842              | 416.232                            | 25.035      |
| 13                                                                                | 14:00           | 1.56                                                                     | 180             | 1.1996842              | 416.232                            | 25.018      |
| 14                                                                                | 14:15           | 1.58                                                                     | 195             | 1.1996811              | 416.232                            | 25.020      |
| 15                                                                                | 14:30           | 1.58                                                                     | 210             | 1.1996811              | 416.232                            | 25.011      |
| 16                                                                                | 14:45           | 1.58                                                                     | 225             | 1.1996811              | 416.231                            | 25.006      |
| 17                                                                                | 15:00           | 1.58                                                                     | 240             | 1.1996811              | 416.231                            | 25.038      |
| 18                                                                                | 15:15           | 1.58                                                                     | 255             | 1.1996811              | 416.231                            | 25.101      |
| 19                                                                                | 15:30           | 1.56                                                                     | 270             | 1.1996842              | 416.232                            | 25.090      |
| 20                                                                                | 15:45           | 1.56                                                                     | 285             | 1.1996842              | 416.233                            | 25.113      |
| 21                                                                                | 16:00           | 1.56                                                                     | 300             | 1.1996842              | 416.232                            | 25.088      |
| 22                                                                                | 16:15           | 1.56                                                                     | 315             | 1.1996842              | 416.233                            | 25.170      |

**Anexo 18. Registro de mediciones de campo magnético por el método de Efecto Hall  
régimen estático**

| #  | Voltaje Shunt (mV) | Campo (T) | #  | Voltaje Shunt (mV) | Campo Hall (T) | #  | Voltaje Shunt (mV) | Campo (T) | #  | Voltaje Shunt (mV) | Campo (T) |
|----|--------------------|-----------|----|--------------------|----------------|----|--------------------|-----------|----|--------------------|-----------|
| 1  | 1.145              | 0.0054    | 13 | 80.040             | 0.2300         | 25 | 301.190            | 0.8700    | 37 | 540.375            | 1.5370    |
| 2  | 1.120              | 0.0054    | 14 | 90.330             | 0.2600         | 26 | 320.490            | 0.9250    | 38 | 550.167            | 1.5630    |
| 3  | 5.196              | 0.0180    | 15 | 105.463            | 0.3040         | 27 | 340.745            | 0.9830    | 39 | 560.826            | 1.5870    |
| 4  | 12.300             | 0.0366    | 16 | 120.000            | 0.3460         | 28 | 360.923            | 1.0400    | 40 | 570.629            | 1.6130    |
| 5  | 20.000             | 0.0581    | 17 | 140.400            | 0.4040         | 29 | 380.713            | 1.0970    | 41 | 580.866            | 1.6370    |
| 6  | 25.240             | 0.0738    | 18 | 160.460            | 0.4630         | 30 | 400.343            | 1.1520    | 42 | 590.925            | 1.6610    |
| 7  | 30.840             | 0.0891    | 19 | 181.340            | 0.5240         | 31 | 420.332            | 1.2080    | 43 | 600.269            | 1.6830    |
| 8  | 36.298             | 0.1047    | 20 | 204.287            | 0.5900         | 32 | 439.985            | 1.2630    | 44 | 610.331            | 1.7060    |
| 9  | 42.689             | 0.1229    | 21 | 227.060            | 0.6550         | 33 | 460.820            | 1.3210    | 45 | 620.598            | 1.7300    |
| 10 | 50.791             | 0.1462    | 22 | 240.220            | 0.6940         | 34 | 481.030            | 1.3740    | 46 | 630.090            | 1.7500    |
| 11 | 61.050             | 0.1756    | 23 | 261.791            | 0.7570         | 35 | 500.635            | 1.4290    | 47 | 639.962            | 1.7711    |
| 12 | 70.698             | 0.2030    | 24 | 280.885            | 0.8110         | 36 | 520.725            | 1.4830    |    |                    |           |

## Anexo 19. Programa que analiza los datos a régimen estacionario (ExperimentoHallyModelo2.m)

```
% MEDICIONES DE VOLTAGE CONTRA CAMPO MAGNÉTICO
% Archivo de datos preparados verificar la linealidad del sistema
% Datos del experimento
% MEDICIÓN: Experimento 1 Efecto Hall
clear;
clc
% MEDICIONES DE SALIDA DEL CAMPO MAGNÉTICO
%1T=10 000G por lo tanto hay que convertir las mediciones de salida de
%campo magnético de Gauss a tesla
y=[53.7;180;366;581;738;891;1047;1229;1462;1756;2030;2300;2600;3040;3460;4040;
4630;5240;5900;6550;6940;7570;8110;8700;9250;9830;10400;10970;11520;12080;
12630;13210;13740;14290;14830;15370;15630;15870;16130;16370;16610;16830;
17060;17300;17500;17711]; % EN GAUSS
%MEDICIONES CONVERTIDAS A TESLA
z=y/10000; % EN tesla
% MEDICIONES DE ENTRADA DEL CAMPO MAGNÉTICO EN mV
u=[1.120;5.196;12.300;20.000;25.240;30.840;36.298;42.689;50.791;61.050;
70.698;80.040;90.330;105.463;120.000;140.400;160.460;181.340;204.287;
227.060;240.220;261.791;280.885;301.190;320.490;340.745;360.923;
380.713;400.343;420.332;439.985;460.820;481.030;500.635;520.725;
540.375;550.167;560.826;570.629;580.866;590.925;600.269;610.331;
620.598;630.090;639.962];
plot(u,z,'*r'),...
grid,...
title('Experimento 1: Linealidad del Sistema Magnético a Régimen Estacionario.'),...
xlabel('Voltaje shunt ( mV ) '),...
ylabel('Campo magnético tesla ( T ) ')
%Area de calculo de los coeficiente del polinomio de ajuste.
[P,S] = polyfit(u,z,1);
disp('Los coeficientes del polinomio de mejor ajuste son (para el sistema completo)')
disp(P)
[Yhat,delta] = polyval(P,u,S);
disp('El error de predicción del modelo es')
disp(delta)
N=input('Press any to')
plot(u,z,'*r',u,Yhat,'b'),...
grid,...
title('Experimento 1: Ajuste de la linealidad del Sistema Magnético a Régimen Estacionario.'),...
xlabel('Voltaje shunt ( mV ) '),...
ylabel('Campo magnético tesla ( T ) ')
N=input('Presione enter para continuar')
%Con los datos dentro de la primera zona lineal
u1=u(1:35);
z1=z(1:35);
plot(u1,z1,'*r'),...
grid,...
title('Experimento 1: Primera Zona Lineal del Sistema Magnético.'),...
xlabel('Voltaje shunt ( mV ) '),...
ylabel('Campo magnético tesla ( T ) ')
[P1,S1] = polyfit(u1,z1,1);
disp('Los coeficientes del polinomio de mejor ajuste son (para la primera zona)')
disp(P1)
```

```
[Yhat1,delta1] = polyval(P1,u1,S1);
disp('El error de predicción del modelo es')
disp(delta1)
N=input('Presione enter para continuar')
plot(u1,z1,'*r',u1,Yhat1,'b'),...
grid,...
title('Experimento 1: Ajuste de la Primera Zona Lineal del Sistema Magnético.'),...
xlabel('Voltaje shunt ( mV ) '),...
ylabel('Campo magnético tesla ( T ) ')
%Con los datos dentro de la segunda zona lineal
N=input('Presione enter para continuar')
u2=u(35:length(u));
z2=z(35:length(u));
plot(u2,z2,'*r'),...
grid,...
title('Experimento 1: Segunda Zona Lineal del Sistema Magnético.'),...
xlabel('Voltaje shunt ( mV ) '),...
ylabel('Campo magnético tesla ( T ) ')
[P2,S2] = polyfit(u2,z2,1);
disp('Los coeficientes del polinomio de mejor ajuste son (segunda zona)')
disp(P2)
[Yhat2,delta2] = polyval(P2,u2,S2);
disp('El error de predicción del modelo es')
disp(delta2)

N=input('Presione enter para continuar')
plot(u2,z2,'*r',u2,Yhat2,'b'),...
grid,...
title('Experimento 1: Ajuste de la Segunda Zona Lineal del Sistema Magnético.'),...
xlabel('Voltaje shunt ( mV ) '),...
ylabel('Campo magnético tesla ( T ) ')
N=input('Presione enter para continuar')
plot(u,z,'*r',u1,Yhat1,'b',u2,Yhat2,'k'),...
grid,...
title('Experimento 1: Suma de la Primera y Segunda Zona Lineal.'),...
xlabel('Voltaje shunt ( mV ) '),...
ylabel('Campo magnético tesla ( T ) ')
%fin
```



ExperimentoHallyModelo2.m

## Anexo 20. Análisis estático del electroimán con todos los datos del experimento por Efecto Hall

Los coeficientes del polinomio de mejor ajuste son (para el sistema completo): 0.0028 0.0105

El error de predicción del modelo es: 0.0133

|     |        |     |        |     |        |     |        |     |        |
|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 1.  | 0.0134 | 12. | 0.0133 | 23. | 0.0131 | 34. | 0.0132 | 45. | 0.0134 |
| 2.  | 0.0134 | 13. | 0.0133 | 24. | 0.0131 | 35. | 0.0133 | 46. | 0.0135 |
| 3.  | 0.0134 | 14. | 0.0132 | 25. | 0.0131 | 36. | 0.0133 |     |        |
| 4.  | 0.0134 | 15. | 0.0132 | 26. | 0.0131 | 37. | 0.0133 |     |        |
| 5.  | 0.0133 | 16. | 0.0132 | 27. | 0.0131 | 38. | 0.0133 |     |        |
| 6.  | 0.0133 | 17. | 0.0132 | 28. | 0.0131 | 39. | 0.0133 |     |        |
| 7.  | 0.0133 | 18. | 0.0132 | 29. | 0.0132 | 40. | 0.0134 |     |        |
| 8.  | 0.0133 | 19. | 0.0132 | 30. | 0.0132 | 41. | 0.0134 |     |        |
| 9.  | 0.0133 | 20. | 0.0131 | 31. | 0.0132 | 42. | 0.0134 |     |        |
| 10. | 0.0133 | 21. | 0.0131 | 32. | 0.0132 | 43. | 0.0134 |     |        |
| 11. | 0.0133 | 22. | 0.0131 | 33. | 0.0132 | 44. | 0.0134 |     |        |

## Anexo 21. Análisis estático del electroimán con los datos de la zona lineal por Efecto Hall.

Los coeficientes del polinomio de mejor ajuste son (para la primera zona): 0.0029 0.0026

El error de predicción del modelo es: 0.0037

|     |        |     |        |     |        |     |        |
|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 1.  | 0.0037 | 11. | 0.0036 | 21. | 0.0036 | 31. | 0.0037 |
| 2.  | 0.0037 | 12. | 0.0036 | 22. | 0.0036 | 32. | 0.0037 |
| 3.  | 0.0037 | 13. | 0.0036 | 23. | 0.0036 | 33. | 0.0037 |
| 4.  | 0.0037 | 14. | 0.0036 | 24. | 0.0036 | 34. | 0.0038 |
| 5.  | 0.0037 | 15. | 0.0036 | 25. | 0.0036 | 35. | 0.0038 |
| 6.  | 0.0037 | 16. | 0.0036 | 26. | 0.0036 |     |        |
| 7.  | 0.0037 | 17. | 0.0036 | 27. | 0.0037 |     |        |
| 8.  | 0.0037 | 18. | 0.0036 | 28. | 0.0037 |     |        |
| 9.  | 0.0037 | 19. | 0.0036 | 29. | 0.0037 |     |        |
| 10. | 0.0037 | 20. | 0.0036 | 30. | 0.0037 |     |        |

## Anexo 22. Análisis estático del electroimán con los datos de la zona de saturación

La segunda zona analizada a partir de la grafica, es la zona no lineal del electroimán donde comienza a saturarse, sin embargo se aproxima a una línea recta, señalando que no se recomienda para realizar los experimentos dinámicos. El modelo se analiza para esta zona aunque los errores de predicción anteriores no son grandes, para demostrar que se cumple que al analizar por tramos los datos, se observa que son mucho menores los errores cuando se consideran los datos linealizados en un único modelo.

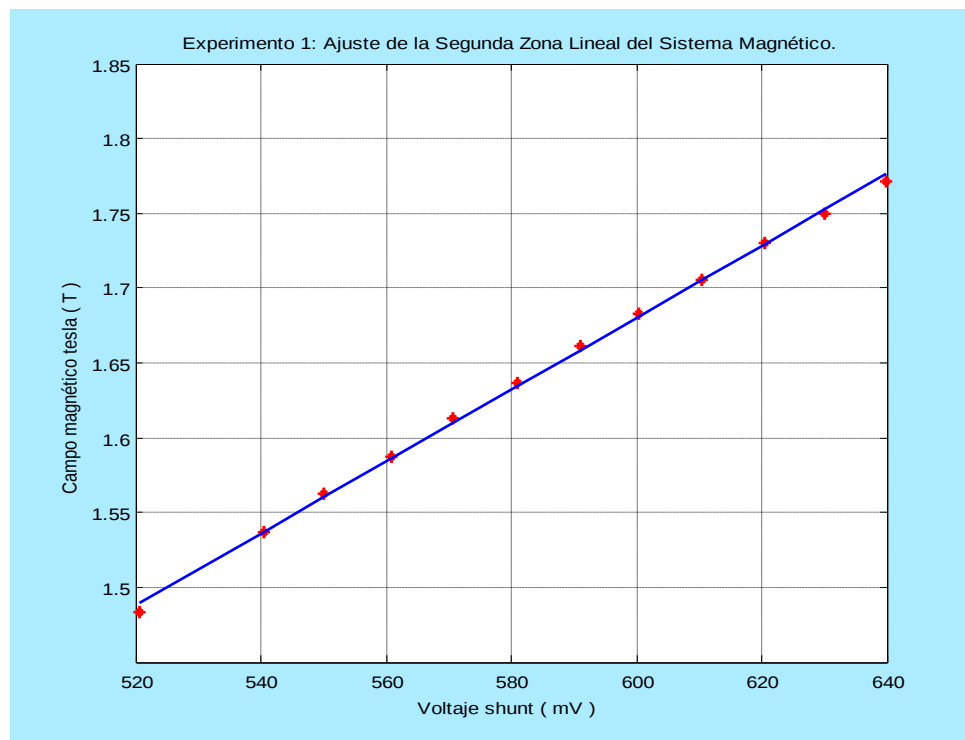
El polinomio de ajuste queda de la forma siguiente:

$$y = 0.0024 * V + 0.2406$$

$$520.725\text{mV} \leq \mu \leq 639.9620\text{mV}$$

- Los coeficientes del polinomio de mejor ajuste son:  $a_3 = 0.0024$  y  $b_3 = 0.2406$ .
- Donde  $a_3$  y  $b_3$  son los coeficientes que describen la recta.
- El error de predicción del modelo es: 0.0036.

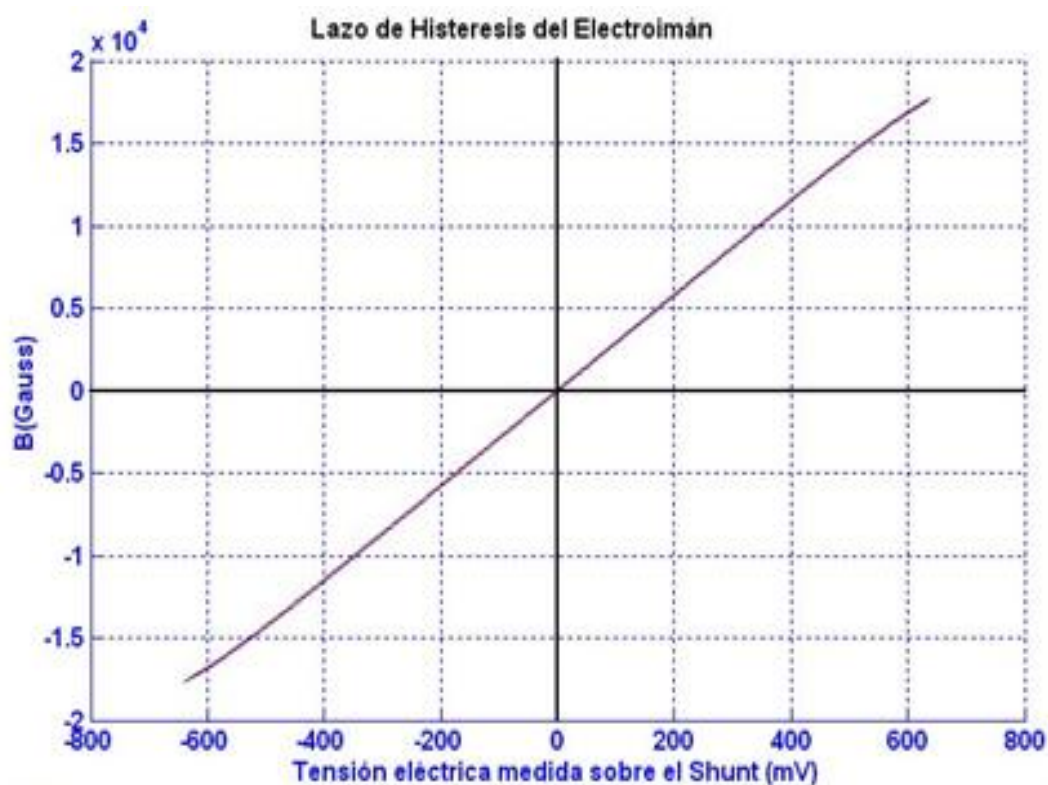
|    |        |    |        |     |        |
|----|--------|----|--------|-----|--------|
| 1. | 0.0040 | 5. | 0.0036 | 9.  | 0.0036 |
| 2. | 0.0037 | 6. | 0.0035 | 10. | 0.0037 |
| 3. | 0.0037 | 7. | 0.0036 | 11. | 0.0038 |
| 4. | 0.0036 | 8. | 0.0036 | 12. | 0.0039 |



**Anexo 23. Registro de mediciones del lazo de histéresis utilizando el Efecto Hall y la gráfica**

| No. | Voltaje (mV) | Campo (Gauss) | No. | Voltaje (mV) | Campo (Gauss) | No. | Voltaje (mV) | Campo (Gauss) | No. | Voltaje (mV) | Campo (Gauss) |
|-----|--------------|---------------|-----|--------------|---------------|-----|--------------|---------------|-----|--------------|---------------|
| 1   | 639,824      | 17720         | 45  | 200,377      | 5870          | 89  | -370,328     | -10610        | 136 | -349,715     | -10170        |
| 2   | 630,009      | 17540         | 46  | 180,011      | 5280          | 90  | -380,197     | -10890        | 137 | -339,289     | -9817         |
| 3   | 620,001      | 17340         | 47  | 159,992      | 4700          | 91  | -390,234     | -11180        | 138 | -330,725     | -9630         |
| 4   | 610,005      | 17130         | 48  | 139,686      | 4110          | 92  | -400,556     | -11410        | 139 | -320,408     | -9340         |
| 5   | 599,992      | 16910         | 49  | 119,862      | 3530          | 93  | -410,787     | -11760        | 140 | -310,189     | -9040         |
| 6   | 590,004      | 16680         | 50  | 99,804       | 2950          | 94  | -420,002     | -12020        | 141 | -300,107     | -8760         |
| 7   | 580,017      | 16440         | 51  | 92,137       | 2730          | 95  | -430,214     | -12300        | 142 | -290,180     | -8470         |
| 8   | 569,990      | 16200         | 52  | 80,061       | 2380          | 96  | -440,143     | -12580        | 143 | -280,156     | -8180         |
| 9   | 560,014      | 15950         | 53  | 69,962       | 2090          | 97  | -449,969     | -12860        | 144 | -270,235     | -7900         |
| 10  | 550,067      | 15700         | 54  | 60,373       | 1810          | 98  | -459,387     | -13120        | 145 | -260,040     | -7600         |
| 11  | 540,007      | 15440         | 55  | 50,741       | 1530          | 99  | -480,230     | -13700        | 146 | -240,185     | -7030         |
| 12  | 530,068      | 15180         | 56  | 40,801       | 1248          | 100 | -500,122     | -14240        | 147 | -220,021     | -6440         |
| 13  | 520,012      | 14920         | 57  | 30,710       | 956           | 101 | -520,314     | -14780        | 148 | -200,129     | -5870         |
| 14  | 510,019      | 14650         | 58  | 20,081       | 647           | 102 | -532,769     | -15110        | 149 | -180,440     | -5290         |
| 15  | 500,001      | 14380         | 59  | 9,999        | 355           | 103 | -540,172     | -15300        | 150 | -160,045     | -4710         |
| 16  | 489,999      | 14110         | 60  | 1,138        | 99,8          | 104 | -550,817     | -15580        | 151 | -150,386     | -4420         |
| 17  | 480,041      | 13840         | 61  | -1,157       | 31,1          | 105 | -560,434     | -15820        | 152 | -140,238     | -4130         |
| 18  | 470,039      | 13570         | 62  | -10,148      | -227          | 106 | -570,048     | -16060        | 153 | -130,226     | -3840         |
| 19  | 460,005      | 13290         | 63  | -19,976      | -512          | 107 | -580,242     | -16320        | 154 | -120,341     | -3550         |
| 20  | 450,013      | 13010         | 64  | -30,583      | -818          | 108 | -590,118     | -16550        | 155 | -110,373     | -3260         |
| 21  | 439,989      | 12730         | 65  | -40,503      | -1106         | 109 | -600,457     | -16800        | 156 | -100,427     | -2970         |
| 22  | 430,017      | 12460         | 66  | -50,907      | -1407         | 110 | -610,449     | -17000        | 157 | -90,152      | -2680         |
| 23  | 420,004      | 12170         | 67  | -60,177      | -1675         | 111 | -620,384     | -17250        | 158 | -80,324      | -2390         |
| 24  | 409,999      | 11890         | 68  | -70,413      | -1930         | 112 | -630,131     | -17470        | 159 | -70,239      | -2100         |
| 25  | 399,998      | 11610         | 69  | -80,755      | -2270         | 113 | -639,820     | -17670        | 160 | -60,389      | -1810         |
| 26  | 390,021      | 11330         | 70  | -90,992      | -2560         | 114 | -630,095     | -17510        | 161 | -50,068      | -1510         |
| 27  | 380,069      | 11040         | 71  | -99,951      | -2820         | 115 | -620,524     | -17330        | 162 | -40,343      | -1234         |
| 28  | 370,051      | 10750         | 72  | -110,713     | -3130         | 116 | -610,058     | -17120        | 163 | -30,821      | -957          |
| 29  | 360,003      | 10470         | 73  | -129,917     | -3690         | 117 | -600,247     | -16900        | 164 | -20,450      | -655          |
| 30  | 350,073      | 10190         | 74  | -150,894     | -4300         | 118 | -590,405     | -16680        | 165 | -10,465      | -366          |
| 31  | 340,024      | 9900          | 75  | -171,142     | -4870         | 119 | -580,400     | -16450        | 166 | -1,087       | -95,8         |
| 32  | 330,021      | 9610          | 76  | -190,978     | -5460         | 120 | -570,547     | -16210        | 167 | 0            | -63,7         |
| 33  | 320,008      | 9320          | 77  | -211,480     | -6050         | 121 | -560,864     | -15970        | 168 | 1,0823       | -26,9         |
| 34  | 310,029      | 9040          | 78  | -230,331     | -6590         | 122 | -550,700     | -15710        | 169 | 4,9278       | 78,0          |
| 35  | 300,035      | 8750          | 79  | -250,131     | -7160         | 123 | -539,829     | -15440        | 170 | 10,870       | 251           |
| 36  | 290,018      | 8460          | 80  | -270,060     | -7740         | 124 | -523,977     | -15020        | 171 | 21,432       | 556           |
| 37  | 279,997      | 8180          | 81  | -290,049     | -8320         | 125 | -500,563     | -14400        | 172 | 33,068       | 895           |
| 38  | 270,040      | 7890          | 82  | -299,948     | -8600         | 126 | -480,772     | -13860        | 173 | 50,343       | 1395          |
| 39  | 260,000      | 7600          | 83  | -310,192     | -8890         | 127 | -460,508     | -13310        | 174 | 58,985       | 1646          |
| 40  | 250,097      | 7310          | 84  | -320,271     | -9180         | 128 | -450,143     | -13020        | 175 | 71,487       | 2000          |
| 41  | 240,178      | 7020          | 85  | -330,146     | -9460         | 129 | -439,769     | -12730        | 176 | 81,138       | 2280          |

|     |         |      |     |          |        |     |          |        |     |         |       |
|-----|---------|------|-----|----------|--------|-----|----------|--------|-----|---------|-------|
| 42  | 230,108 | 6730 | 86  | -340,585 | -9750  | 130 | -429,980 | -12460 | 177 | 101,575 | 2880  |
| 43  | 220,026 | 6440 | 87  | -350,448 | -10040 | 131 | -420,423 | -12190 | 178 | 112,503 | 3190  |
| 44  | 210,016 | 6150 | 88  | -360,325 | -10320 | 132 | -410,357 | -11910 | 179 | 119,962 | 3410  |
| 180 | 132,223 | 3760 | 190 | 250,727  | 7190   | 200 | 400,561  | 11480  | 210 | 541,068 | 15340 |
| 181 | 141,292 | 4020 | 191 | 259,580  | 7440   | 201 | 411,268  | 11790  | 211 | 550,161 | 15570 |
| 182 | 151,016 | 4300 | 192 | 280,733  | 8050   | 202 | 419,577  | 12020  | 212 | 559,901 | 15820 |
| 183 | 161,123 | 4600 | 193 | 300,275  | 8610   | 203 | 430,177  | 12310  | 213 | 570,169 | 16070 |
| 184 | 180,716 | 5160 | 194 | 321,457  | 9230   | 204 | 440,546  | 12600  | 214 | 580,114 | 16320 |
| 185 | 200,880 | 5740 | 195 | 329,678  | 9460   | 205 | 450,076  | 12870  | 215 | 590,564 | 16570 |
| 186 | 212,203 | 6070 | 196 | 340,420  | 9770   | 206 | 460,428  | 13160  | 216 | 600,258 | 16800 |
| 187 | 220,300 | 6310 | 197 | 349,937  | 10040  | 207 | 480,873  | 13720  | 217 | 610,414 | 17040 |
| 188 | 230,775 | 6610 | 198 | 360,916  | 10350  | 208 | 500,109  | 14240  | 218 | 620,133 | 17260 |
| 189 | 240,833 | 6900 | 199 | 380,268  | 10910  | 209 | 520,587  | 14790  | 219 | 631,013 | 17490 |
|     |         |      |     |          |        |     |          |        | 220 | 639,830 | 17680 |



## Anexo 24. Programa que permite graficar la inductancia y la permeabilidad magnética relativa aparente del electroimán Bruker BE-38

```
clear;
clc
% PROGRAMA PARA GRAFICAR LA INDUCTANCIA Y LA
PERMEABILIDAD DEL ELECTROIMÁN
% BRUKER BE-38
% INDUCTANCIA
y=[1.8514;1.8514;1.8511;1.8496;1.8467;1.8443
;1.8399;1.8243;1.7934;1.7588];

% CORRIENTE
u=[0.01;10;20;30;40;45;50;55;60;64];

p = polyfit(u,y,4)
plot(u,y,'--rs','LineWidth',2,...
      'MarkerEdgeColor','k',...
      'MarkerFaceColor','r',...
      'MarkerSize',10)

grid,...
title('Inductancia del electroimán
Bruker BE-38. '),...
xlabel('Corriente ( A ) '),...
ylabel('Inductancia ( H ) ')
h = legend('L (H)',2);
n=input('Presione enter para
continuar');

plot(u,y,'--ro','LineWidth',2,...
      'MarkerEdgeColor','k',...
      'MarkerFaceColor','b',...
      'MarkerSize',10)

grid,...
title('Gráfica de la Inductancia
contra Corriente. '),...
xlabel('Corriente ( A ) '),...
ylabel('Inductancia ( H ) ')
h = legend('L (H)',2);
n=input('Presione enter para
continuar');

%-----
%-----
```

```
% PERMEABILIDAD RELATIVA APARENTE
y=[10.065;10.065;10.063;10.055;10.039;10.0
26;10.002;9.917;9.749;9.561];

% CORRIENTE
u=[0.01;10;20;30;40;45;50;55;60;64];

p = polyfit(u,y,4)
plot(u,y,'--rs','LineWidth',2,...
      'MarkerEdgeColor','k',...
      'MarkerFaceColor','r',...
      'MarkerSize',10)

grid,...
title('Permeabilidad Magnética
Aparente del electroimán Bruker BE-
38. '),...
xlabel('Corriente ( A ) '),...
ylabel('kap')
h = legend('kap-Permeabilidad
aparente en el entrehierro',2);
n=input('Presione enter para
continuar');

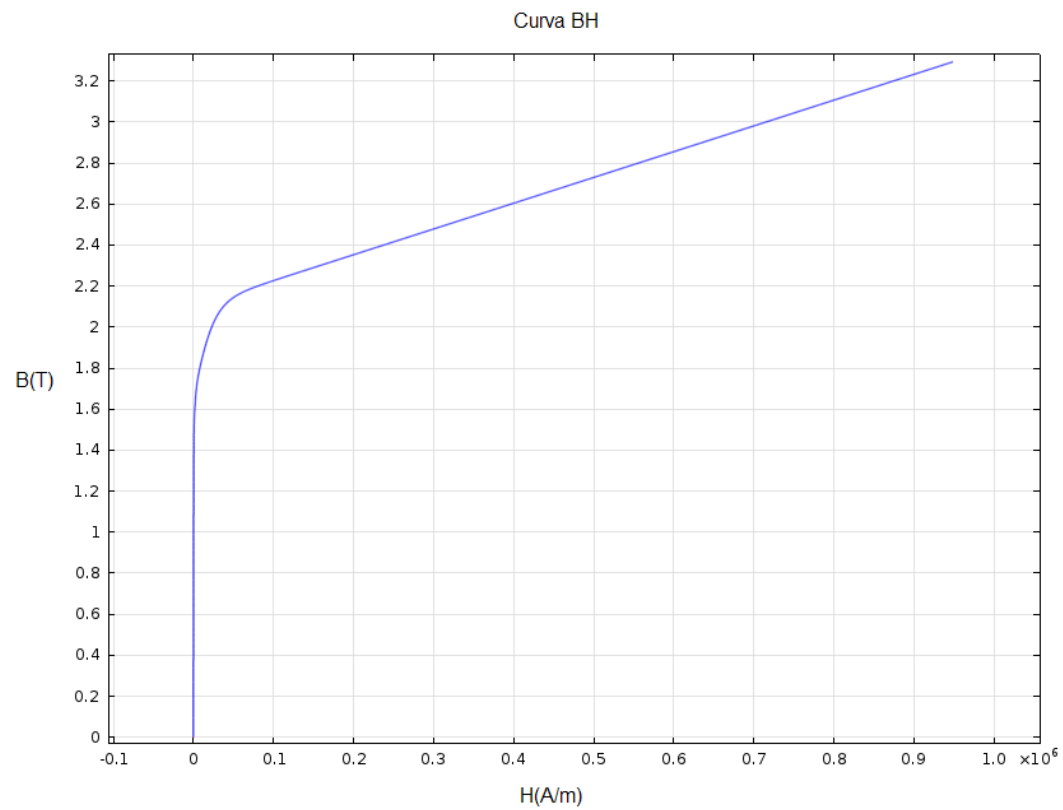
plot(u,y,'--ro','LineWidth',2,...
      'MarkerEdgeColor','k',...
      'MarkerFaceColor','b',...
      'MarkerSize',10)

grid,...
title('Gráfica de la Permeabilidad
Magnética Aparente del electroimán BE-
38. '),...
xlabel('Corriente ( A ) '),...
ylabel('kap')
h = legend('kap-Permeabilidad
aparente en el entrehierro',2);
n=input('Presione enter para
continuar');
```

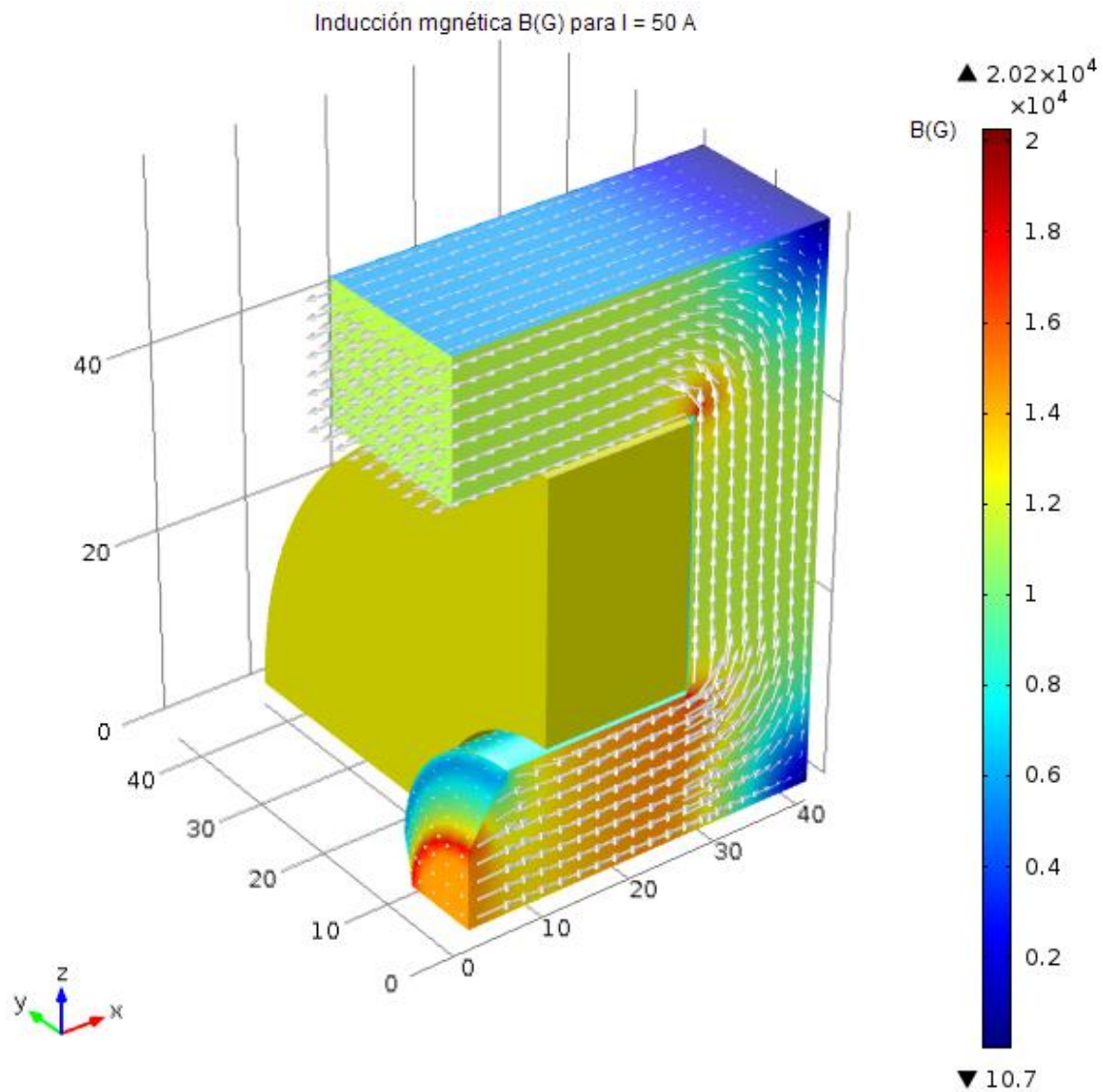


polinomioinduct.m

## Anexo 25. Curva BH del acero con bajo contenido de carbono 1006



**Anexo 26. Mapa de la inducción magnética en el yugo magnético del electroimán, obtenido de las simulaciones para una intensidad de la corriente de 50 A**



## Anexo 27. Tarjeta PCL 711S

# PCL-711S

## Analog and Digital I/O Card



### Introduction

The PCL-711S is a fully-integrated package that offers four of the most popular I/O functions for the PC/AT and compatible systems: A/D conversion, D/A conversion, digital input and digital output.

The inexpensive PCL-711S is ideal for entry level applications. The features of this half-sized card include: eight 12-bit analog inputs, one 12-bit analog output, 16 digital inputs and 16 digital outputs. In addition, it comes with a 20-point screw-terminal board and a flat cable connector.

The PCL-711S performs a variety of I/O jobs, and features solid software support and a large selection of available daughterboards and accessories. It is an ideal and affordable performer for OEMs, schools and hobbyists who require a combination of analog and digital I/O.

### Features

- Eight single-ended analog inputs
- Programmable A/D input range
- A/D, D/A with pacer
- One analog output
- 12-bit A/D and D/A resolution
- 16 digital outputs
- 16 digital inputs
- Includes versatile drivers in popular programming languages plus calibration, demo and example programs
- Screw-terminal board and cable included

### Applications

- DC voltage measurement
- Transducer/sensor interfacing
- Process control
- Programmable voltage output
- Contact closure monitoring
- Digital signal and BCD interfacing
- Industrial On/Off control
- Multiplexer and relay control

### Specifications

#### Analog Input

- Channels: 8 single-ended
- A/D converter: 12 bit, 25  $\mu$ sec. conversion time
- Input range (V):  $\pm 5$ ,  $\pm 2.5$ ,  $\pm 1.25$ ,  $\pm 0.625$ ,  $\pm 0.3125$
- Trigger mode: Software, pacer or external trigger
- Data transfer: Program control, interrupt (IRQs 2 - 7)
- Accuracy: 0.01% of reading  $\pm 1$  bit
- Common mode rejection: 60 dB typical
- Input impedance:  $>10 \text{ M}\Omega$
- Input overvoltage:  $\pm 30 \text{ V}_{\text{DC}}$  max.

#### Analog Output

- Channel: One 12-bit double-buffered channel
- D/A range: 0 - 5 V or 0 - 10 V
- Settling time: 30  $\mu$ sec.

#### Digital Input

- Channels: 16, TTL level

#### Digital Output

- Channels: 16
- Logic level 0: 0.5 V max. @ 8 mA (sink)
- Logic level 1: 2.4 V min. @ 0.4 mA (source)

#### General

- Dimensions: 155 x 100 mm (6.1" x 3.9")

### Ordering Information

- ☐ PCL-711S: PCL-711B card, user's manual, utility diskette with language drivers, PCLD-7115 and 1-m 20-pin flat cable
- ☐ PCL-711B: PCL-711B card only (PCLD-7115, 1-m 20-pin cable, user's manual and utility diskette NOT included).
- ☐ PCLS-OCX: ActiveX Control for data acquisition and control

## Anexo 28. Conector auxiliar del gaussímetro DSP modelo 475



### 3.6 AUXILIARY I/O CONNECTION

The Auxiliary connector is a 25 pin D-sub plug. This provides access to the analog outputs, hardware triggers, and relays. The pins are defined in the following table.



Figure 3-6. Auxiliary I/O Connector

| Pin | Description   | Pin | Description   |
|-----|---------------|-----|---------------|
| 1   | Analog Out 1  | 14  | Ground        |
| 2   | Analog Out 2  | 15  | Ground        |
| 3   | Analog Out 3  | 16  | Ground        |
| 4   | No Connection | 17  | No Connection |
| 5   | Trigger In    | 18  | No Connection |
| 6   | Trigger Out   | 19  | No Connection |
| 7   | No Connection | 20  | No Connection |
| 8   | Relay 1 NO    | 21  | No Connection |
| 9   | Relay 1 COM   | 22  | No Connection |
| 10  | Relay 1 NC    | 23  | No Connection |
| 11  | Relay 2 NO    | 24  | No Connection |
| 12  | Relay 2 COM   | 25  | No Connection |
| 13  | Relay 2 NC    |     |               |

**Analog Output 1:** The first voltage output gives access to amplified voltage signal directly from the probe. This voltage is corrected for the nominal sensitivity of the probe and provides the widest bandwidth of the three voltage outputs. In wideband AC mode, its signal can be viewed on an oscilloscope to observe the shape of AC fields. In peak mode the output can be used to view pulse shape or other characteristic of a momentary signal. Output 1 serves only as a diagnostic tool in DC and narrow band AC modes because modulation the probe signal prevents a clear view of the field response.

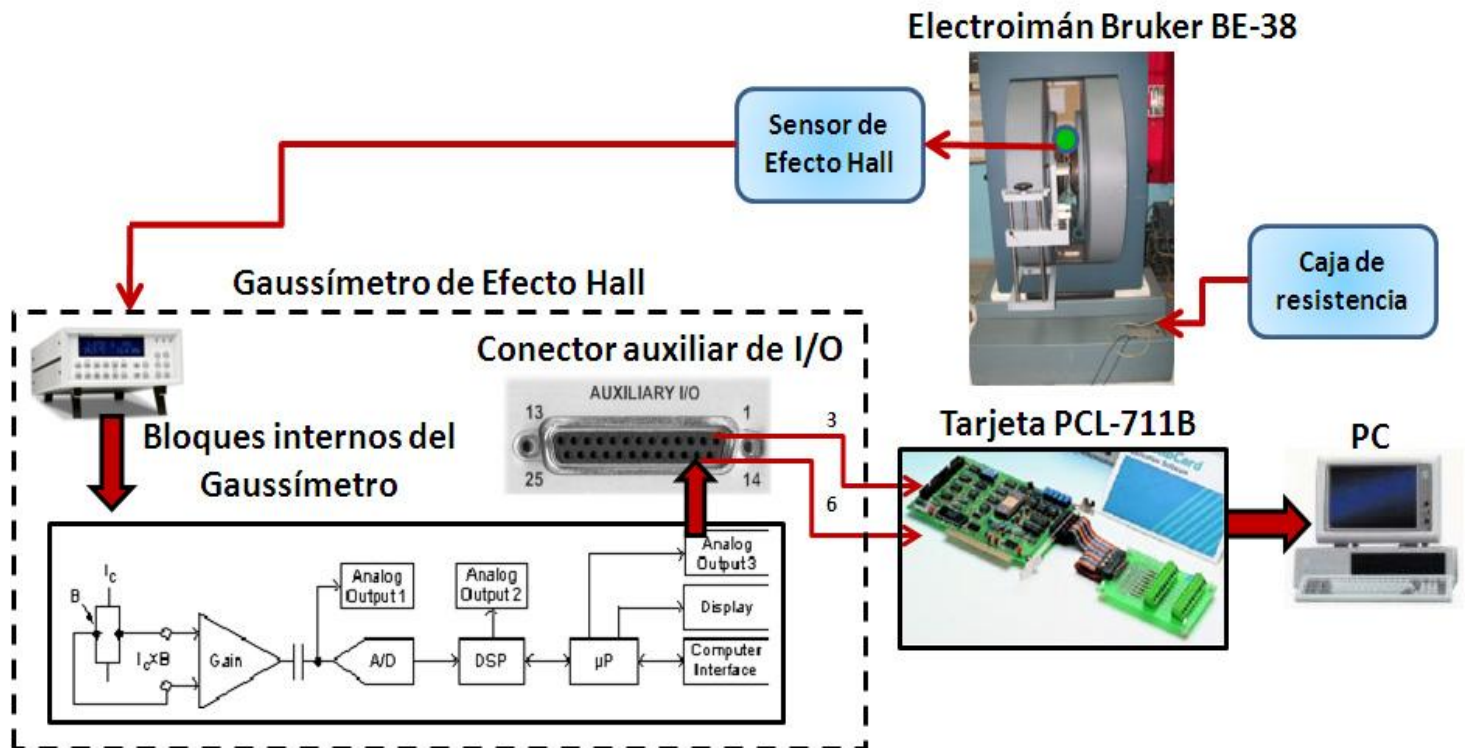
**Analog Output 2:** The second voltage output provides a voltage proportional to measured field with the benefits of some signal processing. The output is produced by the DSP through a fast D/A converter. The output signal is updated at 40 kHz, giving good response for low to mid frequency fields. Signal quality degrades at high frequency because of the sampling rate. Probe offset correction and correction for the nominal sensitivity of the probe can be performed on this signal.

**Analog Output 3:** The third voltage output provides a voltage proportional to measured field with the most signal processing of the three outputs. All probe compensation available to the display readings, including temperature compensation, can be performed on this output. The output is produced by the microprocessor through a high-resolution, 16-bit, D/A converter updated at 30 readings per second. This output can also be used for field control.

**Trigger In and Trigger Out:** A hardware, TTL level, trigger into the instrument can be used to initiate the data log sequence. A hardware, TTL level trigger out of the instrument indicates when the instrument completes a reading and can be used to synchronize other instrument in the system. Refer to Paragraph 5.5 for trigger details.

**Relay1 and Relay 2:** The Model 475 has two mechanical relays designated Relay 1 and Relay 2. The relays are most commonly associated with the high and low alarms, but they can also be controlled manually and used for other purposes. Refer to Paragraph 4.11 for more details.

## Anexo 29. Instrumentación para obtener la medición de campo magnético



**Anexo 30. Sistema de medición con la caja de resistencia, gaussímetro y multímetro digital**



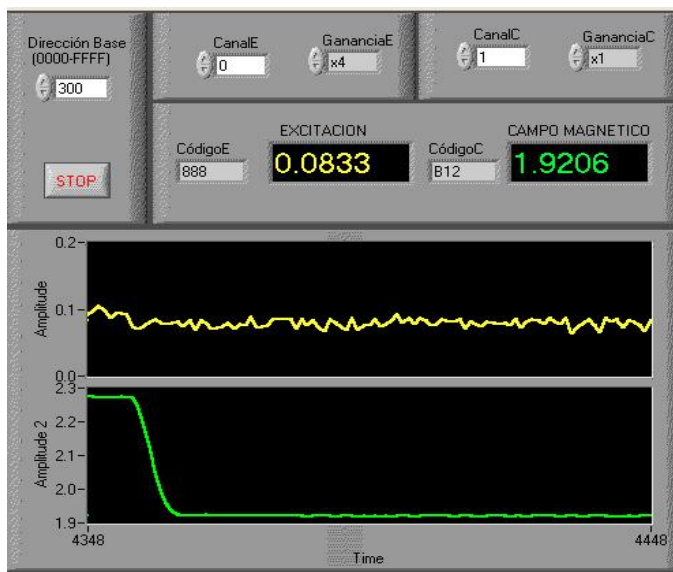
**Anexo 31. Algoritmo del software en LabVIEW 6i que describe la adquisición de datos de la entrada y la salida. Panel frontal para capturar las mediciones**



**Para los dos canales 0 y 1 se siguió la siguiente metodología:**

1. Seleccionar la ganancia.
2. Configurar la tarjeta de acuerdo a los registros para saber el disparo por software y transferencia.
3. Seleccionar canal.
4. Inicio de conversión.
5. Esperar fin de conversión a través un bit de un registro.
6. Lectura de los resultados del bit menos significativo y el bit más significativo, donde al final se lee unido el dato.
7. Calcular el voltaje equivalente.

$V = \frac{C}{4095} * \frac{10}{G} - 5/G$ , Donde **C** es el código del programa y **G** es la ganancia



Panel frontal del programa.



**Anexo 32. Experimento 1: Mediciones a régimen dinámico (279 datos)**

| Experimento 1 escalón arriba |        |                 |                | Experimento 1 escalón abajo |        |                 |                |
|------------------------------|--------|-----------------|----------------|-----------------------------|--------|-----------------|----------------|
| #                            | Tiempo | Voltaje Entrada | Voltaje Salida | #                           | Tiempo | Voltaje Entrada | Voltaje Salida |
| 1.                           | 0      | 0.073565        | 1.910867       | 161.                        | 0      | 0.098596        | 2.272283       |
| 2.                           | 0.5    | 0.090049        | 1.910867       | 162.                        | 0.5    | 0.092491        | 2.272283       |
| 3.                           | 1      | 0.072344        | 1.910867       | 163.                        | 1      | 0.083333        | 2.272283       |
| 4.                           | 1.5    | 0.076007        | 1.910867       | 164.                        | 1.5    | 0.09127         | 2.274725       |
| 5.                           | 2      | 0.077839        | 1.910867       | 165.                        | 2      | 0.096154        | 2.274725       |
| 6.                           | 2.5    | 0.077839        | 1.913309       | 166.                        | 2.5    | 0.094322        | 2.274725       |
| 7.                           | 3      | 0.075397        | 1.910867       | 167.                        | 3      | 0.09188         | 2.274725       |
| 8.                           | 3.5    | 0.071123        | 1.910867       | 168.                        | 3.5    | 0.092491        | 2.272283       |
| 9.                           | 4      | 0.078449        | 1.910867       | 169.                        | 4      | 0.083944        | 2.272283       |
| 10.                          | 4.5    | 0.081502        | 1.910867       | 170.                        | 4.5    | 0.104701        | 2.272283       |
| 11.                          | 5      | 0.074176        | 1.910867       | 171.                        | 5      | 0.094322        | 2.274725       |
| 12.                          | 5.5    | 0.080891        | 1.910867       | 172.                        | 5.5    | 0.093712        | 2.272283       |
| 13.                          | 6      | 0.074786        | 1.910867       | 173.                        | 6      | 0.099206        | 2.272283       |
| 14.                          | 6.5    | 0.070513        | 1.910867       | 174.                        | 6.5    | 0.089438        | 2.274725       |
| 15.                          | 7      | 0.074786        | 1.910867       | 175.                        | 7      | 0.093712        | 2.274725       |
| 16.                          | 7.5    | 0.080281        | 1.913309       | 176.                        | 7.5    | 0.099817        | 2.274725       |
| 17.                          | 8      | 0.071123        | 1.910867       | 177.                        | 8      | 0.102259        | 2.274725       |
| 18.                          | 8.5    | 0.076007        | 1.913309       | 178.                        | 8.5    | 0.090659        | 2.274725       |
| 19.                          | 9      | 0.074786        | 1.910867       | 179.                        | 9      | 0.092491        | 2.274725       |
| 20.                          | 9.5    | 0.077228        | 1.910867       | 180.                        | 9.5    | 0.097375        | 2.274725       |
| 21.                          | 10     | 0.080281        | 1.910867       | 181.                        | 10     | 0.104701        | 2.272283       |
| 22.                          | 10.5   | 0.07967         | 1.910867       | 182.                        | 10.5   | 0.097985        | 2.272283       |
| 23.                          | 11     | 0.090659        | 1.910867       | 183.                        | 11     | 0.086386        | 2.272283       |
| 24.                          | 11.5   | 0.074786        | 1.913309       | 184.                        | 11.5   | 0.094322        | 2.272283       |
| 25.                          | 12     | 0.074176        | 1.910867       | 185.                        | 12     | 0.093101        | 2.274725       |
| 26.                          | 12.5   | 0.076007        | 1.910867       | 186.                        | 12.5   | 0.092491        | 2.272283       |
| 27.                          | 13     | 0.074786        | 1.910867       | 187.                        | 13     | 0.074176        | 2.269841       |
| 28.                          | 13.5   | 0.07906         | 1.910867       | 188.                        | 13.5   | 0.069902        | 2.242979       |
| 29.                          | 14     | 0.082112        | 1.910867       | 189.                        | 14     | 0.073565        | 2.194139       |
| 30.                          | 14.5   | 0.077228        | 1.910867       | 190.                        | 14.5   | 0.081502        | 2.118437       |
| 31.                          | 15     | 0.082112        | 1.910867       | 191.                        | 15     | 0.085165        | 2.042735       |
| 32.                          | 15.5   | 0.07906         | 1.910867       | 192.                        | 15.5   | 0.07906         | 1.991453       |
| 33.                          | 16     | 0.083944        | 1.910867       | 193.                        | 16     | 0.077839        | 1.952381       |
| 34.                          | 16.5   | 0.085775        | 1.918193       | 194.                        | 16.5   | 0.07967         | 1.935287       |
| 35.                          | 17     | 0.094933        | 1.940171       | 195.                        | 17     | 0.080891        | 1.925519       |
| 36.                          | 17.5   | 0.093712        | 1.991453       | 196.                        | 17.5   | 0.073565        | 1.923077       |
| 37.                          | 18     | 0.072955        | 2.064713       | 197.                        | 18     | 0.082112        | 1.923077       |

|     |      |          |          |      |      |          |          |
|-----|------|----------|----------|------|------|----------|----------|
| 38. | 18.5 | 0.105922 | 2.137973 | 198. | 18.5 | 0.068681 | 1.923077 |
| 39. | 19   | 0.10348  | 2.199023 | 199. | 19   | 0.082112 | 1.923077 |
| 40. | 19.5 | 0.093712 | 2.228327 | 200. | 19.5 | 0.07967  | 1.925519 |
| 41. | 20   | 0.093712 | 2.250305 | 201. | 20   | 0.069902 | 1.920635 |
| 42. | 20.5 | 0.094322 | 2.260073 | 202. | 20.5 | 0.071734 | 1.920635 |
| 43. | 21   | 0.107143 | 2.264957 | 203. | 21   | 0.074176 | 1.920635 |
| 44. | 21.5 | 0.09188  | 2.264957 | 204. | 21.5 | 0.07906  | 1.923077 |
| 45. | 22   | 0.089438 | 2.264957 | 205. | 22   | 0.071123 | 1.923077 |
| 46. | 22.5 | 0.100427 | 2.267399 | 206. | 22.5 | 0.076618 | 1.923077 |
| 47. | 23   | 0.090659 | 2.267399 | 207. | 23   | 0.074786 | 1.920635 |
| 48. | 23.5 | 0.099817 | 2.264957 | 208. | 23.5 | 0.088217 | 1.920635 |
| 49. | 24   | 0.093101 | 2.269841 | 209. | 24   | 0.072955 | 1.920635 |
| 50. | 24.5 | 0.099817 | 2.267399 | 210. | 24.5 | 0.073565 | 1.920635 |
| 51. | 25   | 0.090049 | 2.269841 | 211. | 25   | 0.074786 | 1.920635 |
| 52. | 25.5 | 0.088217 | 2.269841 | 212. | 25.5 | 0.085165 | 1.920635 |
| 53. | 26   | 0.106532 | 2.267399 | 213. | 26   | 0.085165 | 1.920635 |
| 54. | 26.5 | 0.094933 | 2.269841 | 214. | 26.5 | 0.084554 | 1.920635 |
| 55. | 27   | 0.093101 | 2.269841 | 215. | 27   | 0.085165 | 1.920635 |
| 56. | 27.5 | 0.094933 | 2.269841 | 216. | 27.5 | 0.071123 | 1.923077 |
| 57. | 28   | 0.095543 | 2.269841 | 217. | 28   | 0.083944 | 1.920635 |
| 58. | 28.5 | 0.094933 | 2.269841 | 218. | 28.5 | 0.076007 | 1.918193 |
| 59. | 29   | 0.09188  | 2.269841 | 219. | 29   | 0.083333 | 1.920635 |
| 60. | 29.5 | 0.086386 | 2.269841 | 220. | 29.5 | 0.072344 | 1.920635 |
| 61. | 30   | 0.102869 | 2.269841 | 221. | 30   | 0.066239 | 1.920635 |
| 62. | 30.5 | 0.094322 | 2.269841 | 222. | 30.5 | 0.083944 | 1.920635 |
| 63. | 31   | 0.09188  | 2.272283 | 223. | 31   | 0.07967  | 1.918193 |
| 64. | 31.5 | 0.094322 | 2.272283 | 224. | 31.5 | 0.073565 | 1.920635 |
| 65. | 32   | 0.089438 | 2.274725 | 225. | 32   | 0.068071 | 1.920635 |
| 66. | 32.5 | 0.090659 | 2.272283 | 226. | 32.5 | 0.085775 | 1.920635 |
| 67. | 33   | 0.090659 | 2.272283 | 227. | 33   | 0.068071 | 1.918193 |
| 68. | 33.5 | 0.089438 | 2.272283 | 228. | 33.5 | 0.075397 | 1.920635 |
| 69. | 34   | 0.100427 | 2.272283 | 229. | 34   | 0.075397 | 1.918193 |
| 70. | 34.5 | 0.107143 | 2.272283 | 230. | 34.5 | 0.085165 | 1.920635 |
| 71. | 35   | 0.092491 | 2.274725 | 231. | 35   | 0.074176 | 1.918193 |
| 72. | 35.5 | 0.078449 | 2.272283 | 232. | 35.5 | 0.077839 | 1.920635 |
| 73. | 36   | 0.098596 | 2.272283 | 233. | 36   | 0.083333 | 1.918193 |
| 74. | 36.5 | 0.099817 | 2.272283 | 234. | 36.5 | 0.092491 | 1.920635 |
| 75. | 37   | 0.088828 | 2.269841 | 235. | 37   | 0.07906  | 1.920635 |
| 76. | 37.5 | 0.096154 | 2.272283 | 236. | 37.5 | 0.086386 | 1.920635 |
| 77. | 38   | 0.088217 | 2.274725 | 237. | 38   | 0.077839 | 1.918193 |
| 78. | 38.5 | 0.098596 | 2.272283 | 238. | 38.5 | 0.086386 | 1.920635 |

|      |      |          |          |      |      |          |          |
|------|------|----------|----------|------|------|----------|----------|
| 79.  | 39   | 0.094933 | 2.274725 | 239. | 39   | 0.082112 | 1.920635 |
| 80.  | 39.5 | 0.10348  | 2.272283 | 240. | 39.5 | 0.075397 | 1.920635 |
| 81.  | 40   | 0.10348  | 2.272283 | 241. | 40   | 0.077839 | 1.920635 |
| 82.  | 40.5 | 0.099206 | 2.272283 | 242. | 40.5 | 0.085165 | 1.920635 |
| 83.  | 41   | 0.095543 | 2.274725 | 243. | 41   | 0.081502 | 1.920635 |
| 84.  | 41.5 | 0.090049 | 2.272283 | 244. | 41.5 | 0.080891 | 1.918193 |
| 85.  | 42   | 0.092491 | 2.272283 | 245. | 42   | 0.085165 | 1.920635 |
| 86.  | 42.5 | 0.093712 | 2.274725 | 246. | 42.5 | 0.070513 | 1.920635 |
| 87.  | 43   | 0.098596 | 2.272283 | 247. | 43   | 0.080281 | 1.923077 |
| 88.  | 43.5 | 0.09188  | 2.272283 | 248. | 43.5 | 0.076618 | 1.918193 |
| 89.  | 44   | 0.086996 | 2.274725 | 249. | 44   | 0.073565 | 1.918193 |
| 90.  | 44.5 | 0.086386 | 2.272283 | 250. | 44.5 | 0.080281 | 1.920635 |
| 91.  | 45   | 0.086996 | 2.272283 | 251. | 45   | 0.07906  | 1.920635 |
| 92.  | 45.5 | 0.083333 | 2.272283 | 252. | 45.5 | 0.077228 | 1.920635 |
| 93.  | 46   | 0.098596 | 2.272283 | 253. | 46   | 0.078449 | 1.920635 |
| 94.  | 46.5 | 0.09188  | 2.272283 | 254. | 46.5 | 0.075397 | 1.918193 |
| 95.  | 47   | 0.090049 | 2.272283 | 255. | 47   | 0.084554 | 1.920635 |
| 96.  | 47.5 | 0.095543 | 2.274725 | 256. | 47.5 | 0.072955 | 1.920635 |
| 97.  | 48   | 0.097375 | 2.274725 | 257. | 48   | 0.081502 | 1.918193 |
| 98.  | 48.5 | 0.090049 | 2.274725 | 258. | 48.5 | 0.083944 | 1.920635 |
| 99.  | 49   | 0.092491 | 2.272283 | 259. | 49   | 0.082723 | 1.920635 |
| 100. | 49.5 | 0.094322 | 2.269841 | 260. | 49.5 | 0.077839 | 1.920635 |
| 101. | 50   | 0.094322 | 2.272283 | 261. | 50   | 0.085775 | 1.920635 |
| 102. | 50.5 | 0.09127  | 2.274725 | 262. | 50.5 | 0.081502 | 1.920635 |
| 103. | 51   | 0.090659 | 2.272283 | 263. | 51   | 0.077839 | 1.918193 |
| 104. | 51.5 | 0.088217 | 2.274725 | 264. | 51.5 | 0.086386 | 1.920635 |
| 105. | 52   | 0.095543 | 2.272283 | 265. | 52   | 0.063797 | 1.920635 |
| 106. | 52.5 | 0.098596 | 2.272283 | 266. | 52.5 | 0.071734 | 1.920635 |
| 107. | 53   | 0.096154 | 2.272283 | 267. | 53   | 0.07967  | 1.918193 |
| 108. | 53.5 | 0.099817 | 2.274725 | 268. | 53.5 | 0.083944 | 1.920635 |
| 109. | 54   | 0.099206 | 2.274725 | 269. | 54   | 0.075397 | 1.920635 |
| 110. | 54.5 | 0.100427 | 2.274725 | 270. | 54.5 | 0.065629 | 1.920635 |
| 111. | 55   | 0.087607 | 2.272283 | 271. | 55   | 0.085775 | 1.920635 |
| 112. | 55.5 | 0.093101 | 2.274725 | 272. | 55.5 | 0.080281 | 1.918193 |
| 113. | 56   | 0.094933 | 2.272283 | 273. | 56   | 0.083944 | 1.918193 |
| 114. | 56.5 | 0.094322 | 2.272283 | 274. | 56.5 | 0.071734 | 1.918193 |
| 115. | 57   | 0.097985 | 2.274725 | 275. | 57   | 0.082723 | 1.920635 |
| 116. | 57.5 | 0.100427 | 2.272283 | 276. | 57.5 | 0.081502 | 1.918193 |
| 117. | 58   | 0.09127  | 2.274725 | 277. | 58   | 0.076007 | 1.920635 |
| 118. | 58.5 | 0.083333 | 2.272283 | 278. | 58.5 | 0.06685  | 1.920635 |
| 119. | 59   | 0.100427 | 2.274725 | 279. | 59   | 0.083333 | 1.920635 |

|      |      |          |          |
|------|------|----------|----------|
| 120. | 59.5 | 0.09127  | 2.272283 |
| 121. | 60   | 0.102869 | 2.274725 |
| 122. | 60.5 | 0.095543 | 2.272283 |
| 123. | 61   | 0.089438 | 2.272283 |
| 124. | 61.5 | 0.102869 | 2.274725 |
| 125. | 62   | 0.093101 | 2.274725 |
| 126. | 62.5 | 0.09188  | 2.272283 |
| 127. | 63   | 0.094933 | 2.272283 |
| 128. | 63.5 | 0.090049 | 2.272283 |
| 129. | 64   | 0.086386 | 2.274725 |
| 130. | 64.5 | 0.098596 | 2.272283 |
| 131. | 65   | 0.099206 | 2.272283 |
| 132. | 65.5 | 0.094933 | 2.274725 |
| 133. | 66   | 0.084554 | 2.272283 |
| 134. | 66.5 | 0.085775 | 2.272283 |
| 135. | 67   | 0.094322 | 2.272283 |
| 136. | 67.5 | 0.10348  | 2.272283 |
| 137. | 68   | 0.096154 | 2.274725 |
| 138. | 68.5 | 0.085775 | 2.274725 |
| 139. | 69   | 0.095543 | 2.272283 |
| 140. | 69.5 | 0.094933 | 2.274725 |
| 141. | 70   | 0.09188  | 2.272283 |
| 142. | 70.5 | 0.090659 | 2.272283 |
| 143. | 71   | 0.093712 | 2.272283 |
| 144. | 71.5 | 0.096764 | 2.272283 |
| 145. | 72   | 0.086996 | 2.272283 |
| 146. | 72.5 | 0.09188  | 2.272283 |
| 147. | 73   | 0.090659 | 2.274725 |
| 148. | 73.5 | 0.10409  | 2.274725 |
| 149. | 74   | 0.089438 | 2.272283 |
| 150. | 74.5 | 0.097985 | 2.274725 |
| 151. | 75   | 0.096764 | 2.272283 |
| 152. | 75.5 | 0.099817 | 2.274725 |
| 153. | 76   | 0.095543 | 2.272283 |
| 154. | 76.5 | 0.093101 | 2.274725 |
| 155. | 77   | 0.094933 | 2.274725 |
| 156. | 77.5 | 0.095543 | 2.272283 |
| 157. | 78   | 0.102259 | 2.274725 |
| 158. | 78.5 | 0.098596 | 2.272283 |
| 159. | 79   | 0.094322 | 2.274725 |
| 160. | 79.5 | 0.095543 | 2.274725 |

**Anexo 33. Experimento 2. Mediciones a régimen dinámico (226 datos)**

| Experimento 2 escalón arriba |            |                     |                    | Experimento 2 escalón abajo |            |                     |                    |
|------------------------------|------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|------------|---------------------|--------------------|
| #                            | Tiempo (s) | Voltaje Entrada (V) | Voltaje Salida (V) | #                           | Tiempo (s) | Voltaje Entrada (V) | Voltaje Salida (V) |
| 1.                           | 0          | 0.130342            | 2.956044           | 135.                        | 116.5      | 0.138889            | 3.271              |
| 2.                           | 0.5        | 0.119353            | 2.956044           | 136.                        | 117        | 0.143162            | 3.271              |
| 3.                           | 1          | 0.1163              | 2.958486           | 137.                        | 117.5      | 0.121795            | 3.273              |
| 4.                           | 1.5        | 0.109585            | 2.958486           | 138.                        | 118        | 0.137057            | 3.271              |
| 5.                           | 2          | 0.12851             | 2.958486           | 139.                        | 118.5      | 0.123626            | 3.273              |
| 6.                           | 2.5        | 0.126679            | 2.956044           | 140.                        | 119        | 0.141941            | 3.273              |
| 7.                           | 3          | 0.116911            | 2.958486           | 141.                        | 119.5      | 0.12851             | 3.273              |
| 8.                           | 3.5        | 0.122405            | 2.956044           | 142.                        | 120        | 0.130952            | 3.273              |
| 9.                           | 4          | 0.117521            | 2.956044           | 143.                        | 120.5      | 0.129731            | 3.273              |
| 10.                          | 4.5        | 0.130952            | 2.958486           | 144.                        | 121        | 0.135836            | 3.271              |
| 11.                          | 5          | 0.111416            | 2.958486           | 145.                        | 121.5      | 0.138889            | 3.273              |
| 12.                          | 5.5        | 0.124237            | 2.958486           | 146.                        | 122        | 0.138889            | 3.271              |
| 13.                          | 6          | 0.124237            | 2.956044           | 147.                        | 122.5      | 0.132784            | 3.273              |
| 14.                          | 6.5        | 0.126679            | 2.956044           | 148.                        | 123        | 0.129121            | 3.273              |
| 15.                          | 7          | 0.124847            | 2.958486           | 149.                        | 123.5      | 0.138889            | 3.273              |
| 16.                          | 7.5        | 0.115079            | 2.958486           | 150.                        | 124        | 0.14011             | 3.273              |
| 17.                          | 8          | 0.120574            | 2.956044           | 151.                        | 124.5      | 0.123016            | 3.271              |
| 18.                          | 8.5        | 0.121795            | 2.958486           | 152.                        | 125        | 0.131563            | 3.271              |
| 19.                          | 9          | 0.121795            | 2.958486           | 153.                        | 125.5      | 0.139499            | 3.273              |
| 20.                          | 9.5        | 0.123626            | 2.958486           | 154.                        | 126        | 0.135836            | 3.271              |
| 21.                          | 10         | 0.121795            | 2.958486           | 155.                        | 126.5      | 0.137668            | 3.271              |
| 22.                          | 10.5       | 0.123016            | 2.958486           | 156.                        | 127        | 0.134005            | 3.273              |
| 23.                          | 11         | 0.132784            | 2.958486           | 157.                        | 127.5      | 0.147436            | 3.271              |
| 24.                          | 11.5       | 0.124847            | 2.953602           | 158.                        | 128        | 0.138278            | 3.275              |
| 25.                          | 12         | 0.119353            | 2.956044           | 159.                        | 128.5      | 0.137057            | 3.273              |
| 26.                          | 12.5       | 0.119353            | 2.958486           | 160.                        | 129        | 0.136447            | 3.271              |
| 27.                          | 13         | 0.118742            | 2.956044           | 161.                        | 129.5      | 0.127289            | 3.271              |
| 28.                          | 13.5       | 0.126068            | 2.958486           | 162.                        | 130        | 0.130342            | 3.273              |
| 29.                          | 14         | 0.119353            | 2.958486           | 163.                        | 130.5      | 0.139499            | 3.271              |
| 30.                          | 14.5       | 0.121795            | 2.958486           | 164.                        | 131        | 0.14072             | 3.271              |
| 31.                          | 15         | 0.118742            | 2.958486           | 165.                        | 131.5      | 0.139499            | 3.273              |
| 32.                          | 15.5       | 0.129121            | 2.958486           | 166.                        | 132        | 0.143162            | 3.273              |
| 33.                          | 16         | 0.119963            | 2.956044           | 167.                        | 132.5      | 0.136447            | 3.273              |
| 34.                          | 16.5       | 0.124237            | 2.958486           | 168.                        | 133        | 0.124847            | 3.271              |
| 35.                          | 17         | 0.1163              | 2.958486           | 169.                        | 133.5      | 0.135836            | 3.273              |

|     |      |          |          |      |       |          |       |
|-----|------|----------|----------|------|-------|----------|-------|
| 36. | 17.5 | 0.1279   | 2.958486 | 170. | 134   | 0.137057 | 3.273 |
| 37. | 18   | 0.119963 | 2.956044 | 171. | 134.5 | 0.14072  | 3.273 |
| 38. | 18.5 | 0.119963 | 2.956044 | 172. | 135   | 0.135226 | 3.271 |
| 39. | 19   | 0.119963 | 2.958486 | 173. | 135.5 | 0.144994 | 3.271 |
| 40. | 19.5 | 0.110806 | 2.956044 | 174. | 136   | 0.137668 | 3.273 |
| 41. | 20   | 0.123626 | 2.956044 | 175. | 136.5 | 0.132784 | 3.271 |
| 42. | 20.5 | 0.119353 | 2.956044 | 176. | 137   | 0.137057 | 3.271 |
| 43. | 21   | 0.115079 | 2.956044 | 177. | 137.5 | 0.129121 | 3.271 |
| 44. | 21.5 | 0.134615 | 2.956044 | 178. | 138   | 0.136447 | 3.273 |
| 45. | 22   | 0.121795 | 2.956044 | 179. | 138.5 | 0.135226 | 3.273 |
| 46. | 22.5 | 0.111416 | 2.958486 | 180. | 139   | 0.14072  | 3.271 |
| 47. | 23   | 0.118742 | 2.956044 | 181. | 139.5 | 0.145604 | 3.271 |
| 48. | 23.5 | 0.11569  | 2.958486 | 182. | 140   | 0.143162 | 3.273 |
| 49. | 24   | 0.121184 | 2.958486 | 183. | 140.5 | 0.125458 | 3.273 |
| 50. | 24.5 | 0.116911 | 2.956044 | 184. | 141   | 0.14011  | 3.273 |
| 51. | 25   | 0.123626 | 2.958486 | 185. | 141.5 | 0.136447 | 3.273 |
| 52. | 25.5 | 0.124847 | 2.958486 | 186. | 142   | 0.132173 | 3.271 |
| 53. | 26   | 0.114469 | 2.956044 | 187. | 142.5 | 0.121184 | 3.268 |
| 54. | 26.5 | 0.124237 | 2.956044 | 188. | 143   | 0.118132 | 3.246 |
| 55. | 27   | 0.119963 | 2.958486 | 189. | 143.5 | 0.117521 | 3.205 |
| 56. | 27.5 | 0.122405 | 2.956044 | 190. | 144   | 0.115079 | 3.144 |
| 57. | 28   | 0.113858 | 2.958486 | 191. | 144.5 | 0.121184 | 3.078 |
| 58. | 28.5 | 0.134615 | 2.958486 | 192. | 145   | 0.122405 | 3.024 |
| 59. | 29   | 0.119353 | 2.958486 | 193. | 145.5 | 0.123626 | 2.992 |
| 60. | 29.5 | 0.127289 | 2.958486 | 194. | 146   | 0.1279   | 2.98  |
| 61. | 30   | 0.129121 | 2.958486 | 195. | 146.5 | 0.114469 | 2.973 |
| 62. | 30.5 | 0.110195 | 2.956044 | 196. | 147   | 0.124237 | 2.968 |
| 63. | 31   | 0.131563 | 2.956044 | 197. | 147.5 | 0.114469 | 2.97  |
| 64. | 31.5 | 0.1279   | 2.958486 | 198. | 148   | 0.109585 | 2.97  |
| 65. | 32   | 0.131563 | 2.960928 | 199. | 148.5 | 0.1279   | 2.97  |
| 66. | 32.5 | 0.137668 | 2.978022 | 200. | 149   | 0.127289 | 2.97  |
| 67. | 33   | 0.138889 | 3.017094 | 201. | 149.5 | 0.132784 | 2.97  |
| 68. | 33.5 | 0.127289 | 3.075702 | 202. | 150   | 0.138278 | 2.97  |
| 69. | 34   | 0.142552 | 3.141636 | 203. | 150.5 | 0.130342 | 2.968 |
| 70. | 34.5 | 0.132784 | 3.19536  | 204. | 151   | 0.119353 | 2.97  |
| 71. | 35   | 0.129121 | 3.229548 | 205. | 151.5 | 0.127289 | 2.968 |
| 72. | 35.5 | 0.145604 | 3.251526 | 206. | 152   | 0.124847 | 2.97  |
| 73. | 36   | 0.129731 | 3.25641  | 207. | 152.5 | 0.122405 | 2.968 |
| 74. | 36.5 | 0.132173 | 3.261294 | 208. | 153   | 0.122405 | 2.97  |
| 75. | 37   | 0.144383 | 3.263736 | 209. | 153.5 | 0.132784 | 2.968 |
| 76. | 37.5 | 0.137668 | 3.263736 | 210. | 154   | 0.116911 | 2.968 |

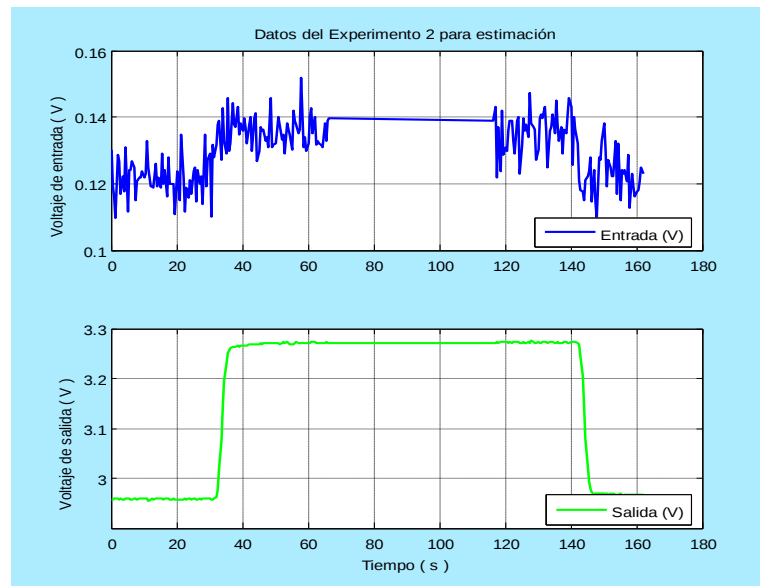
|      |      |          |          |      |       |          |       |
|------|------|----------|----------|------|-------|----------|-------|
| 77.  | 38   | 0.137057 | 3.263736 | 211. | 154.5 | 0.132173 | 2.968 |
| 78.  | 38.5 | 0.143162 | 3.266178 | 212. | 155   | 0.115079 | 2.97  |
| 79.  | 39   | 0.134615 | 3.263736 | 213. | 155.5 | 0.124237 | 2.965 |
| 80.  | 39.5 | 0.138278 | 3.266178 | 214. | 156   | 0.123016 | 2.965 |
| 81.  | 40   | 0.135836 | 3.266178 | 215. | 156.5 | 0.124237 | 2.968 |
| 82.  | 40.5 | 0.139499 | 3.266178 | 216. | 157   | 0.120574 | 2.968 |
| 83.  | 41   | 0.137057 | 3.266178 | 217. | 157.5 | 0.12851  | 2.968 |
| 84.  | 41.5 | 0.132173 | 3.266178 | 218. | 158   | 0.112637 | 2.968 |
| 85.  | 42   | 0.137668 | 3.26862  | 219. | 158.5 | 0.123016 | 2.968 |
| 86.  | 42.5 | 0.14011  | 3.26862  | 220. | 159   | 0.119353 | 2.968 |
| 87.  | 43   | 0.129731 | 3.26862  | 221. | 159.5 | 0.1163   | 2.968 |
| 88.  | 43.5 | 0.139499 | 3.26862  | 222. | 160   | 0.117521 | 2.968 |
| 89.  | 44   | 0.141331 | 3.26862  | 223. | 160.5 | 0.118132 | 2.968 |
| 90.  | 44.5 | 0.126679 | 3.26862  | 224. | 161   | 0.120574 | 2.968 |
| 91.  | 45   | 0.129731 | 3.26862  | 225. | 161.5 | 0.124847 | 2.968 |
| 92.  | 45.5 | 0.137057 | 3.271062 | 226. | 162   | 0.123016 | 2.968 |
| 93.  | 46   | 0.135836 | 3.26862  |      |       |          |       |
| 94.  | 46.5 | 0.136447 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 95.  | 47   | 0.132784 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 96.  | 47.5 | 0.134005 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 97.  | 48   | 0.130952 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 98.  | 48.5 | 0.145604 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 99.  | 49   | 0.130952 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 100. | 49.5 | 0.131563 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 101. | 50   | 0.132173 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 102. | 50.5 | 0.135836 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 103. | 51   | 0.14011  | 3.271062 |      |       |          |       |
| 104. | 51.5 | 0.137668 | 3.26862  |      |       |          |       |
| 105. | 52   | 0.133394 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 106. | 52.5 | 0.134615 | 3.273504 |      |       |          |       |
| 107. | 53   | 0.129121 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 108. | 53.5 | 0.138278 | 3.273504 |      |       |          |       |
| 109. | 54   | 0.136447 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 110. | 54.5 | 0.134615 | 3.26862  |      |       |          |       |
| 111. | 55   | 0.130342 | 3.26862  |      |       |          |       |
| 112. | 55.5 | 0.141941 | 3.26862  |      |       |          |       |
| 113. | 56   | 0.138889 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 114. | 56.5 | 0.137668 | 3.273504 |      |       |          |       |
| 115. | 57   | 0.135226 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 116. | 57.5 | 0.136447 | 3.271062 |      |       |          |       |
| 117. | 58   | 0.151709 | 3.271062 |      |       |          |       |

|      |      |          |          |  |
|------|------|----------|----------|--|
| 118. | 58.5 | 0.130952 | 3.271062 |  |
| 119. | 59   | 0.134005 | 3.271062 |  |
| 120. | 59.5 | 0.129731 | 3.271062 |  |
| 121. | 60   | 0.132173 | 3.271062 |  |
| 122. | 60.5 | 0.14011  | 3.271062 |  |
| 123. | 61   | 0.142552 | 3.273504 |  |
| 124. | 61.5 | 0.135226 | 3.273504 |  |
| 125. | 62   | 0.14011  | 3.273504 |  |
| 126. | 62.5 | 0.131563 | 3.271062 |  |
| 127. | 63   | 0.132784 | 3.271062 |  |
| 128. | 63.5 | 0.131563 | 3.271062 |  |
| 129. | 64   | 0.131563 | 3.271062 |  |
| 130. | 64.5 | 0.130952 | 3.271062 |  |
| 131. | 65   | 0.138278 | 3.271062 |  |
| 132. | 65.5 | 0.132784 | 3.273504 |  |
| 133. | 66   | 0.138889 | 3.271062 |  |
| 134. | 66.5 | 0.139499 | 3.271062 |  |

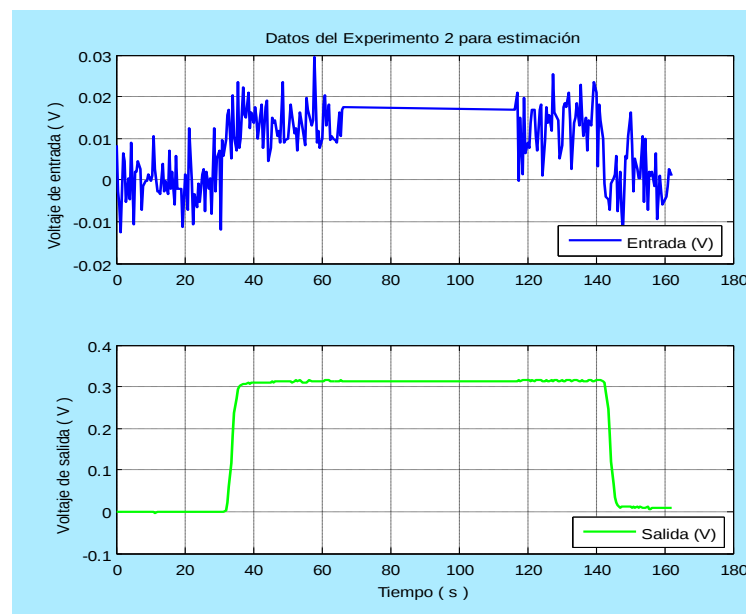
### Anexo 34. Punto de operación del Experimento 2

| Salida campo       |           | Salida voltaje (DC) | Entrada voltaje (DC) |
|--------------------|-----------|---------------------|----------------------|
| Punto de operación | 3.5500 kG | 2.9583 V            | 0.12258 V            |
| Escalón arriba     | 3.9279 kG | 3.2732 V            | 0.13590 V            |
| Escalón abajo      | 3.5627 kG | 2.9688 V            | 0.12258 V            |

### Anexo 35. Conjunto de datos de entrada-salida del Experimento 2



### Anexo 36. Datos de entrada-salida del Experimento 2 sin la componente de offset.



**Anexo 37. Experimento 3 a régimen dinámico (390 datos)**

| Experimento 3 escalón arriba |            |                     |                    | Experimento 3 escalón abajo |            |                     |                    |
|------------------------------|------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|------------|---------------------|--------------------|
| #                            | Tiempo (s) | Voltaje Entrada (V) | Voltaje Salida (V) | #                           | Tiempo (s) | Voltaje Entrada (V) | Voltaje Salida (V) |
| 1.                           | 0          | 0.050977            | 1.13431            | 190.                        | 0          | 0.184676            | 4.431013           |
| 2.                           | 0.5        | 0.046093            | 1.129426           | 191.                        | 0.5        | 0.187118            | 4.431013           |
| 3.                           | 1          | 0.041209            | 1.131868           | 192.                        | 1          | 0.182845            | 4.428571           |
| 4.                           | 1.5        | 0.04304             | 1.131868           | 193.                        | 1.5        | 0.185897            | 4.428571           |
| 5.                           | 2          | 0.04243             | 1.131868           | 194.                        | 2          | 0.180403            | 4.431013           |
| 6.                           | 2.5        | 0.04243             | 1.131868           | 195.                        | 2.5        | 0.186508            | 4.431013           |
| 7.                           | 3          | 0.046093            | 1.131868           | 196.                        | 3          | 0.184066            | 4.428571           |
| 8.                           | 3.5        | 0.046093            | 1.131868           | 197.                        | 3.5        | 0.181624            | 4.428571           |
| 9.                           | 4          | 0.044261            | 1.131868           | 198.                        | 4          | 0.17735             | 4.431013           |
| 10.                          | 4.5        | 0.04304             | 1.13431            | 199.                        | 4.5        | 0.192002            | 4.431013           |
| 11.                          | 5          | 0.039988            | 1.131868           | 200.                        | 5          | 0.184676            | 4.431013           |
| 12.                          | 5.5        | 0.050977            | 1.131868           | 201.                        | 5.5        | 0.07967             | 4.428571           |
| 13.                          | 6          | 0.049756            | 1.131868           | 202.                        | 6          | 0.059524            | 4.421245           |
| 14.                          | 6.5        | 0.057692            | 1.131868           | 203.                        | 6.5        | 0.055861            | 4.374847           |
| 15.                          | 7          | 0.045482            | 1.131868           | 204.                        | 7          | 0.038156            | 4.228327           |
| 16.                          | 7.5        | 0.041209            | 1.131868           | 205.                        | 7.5        | 0.058303            | 3.940171           |
| 17.                          | 8          | 0.046703            | 1.13431            | 206.                        | 8          | 0.060134            | 3.542125           |
| 18.                          | 8.5        | 0.038156            | 1.131868           | 207.                        | 8.5        | 0.053419            | 3.102564           |
| 19.                          | 9          | 0.036935            | 1.131868           | 208.                        | 9          | 0.062576            | 2.689866           |
| 20.                          | 9.5        | 0.037546            | 1.131868           | 209.                        | 9.5        | 0.047924            | 2.330891           |
| 21.                          | 10         | 0.041819            | 1.131868           | 210.                        | 10         | 0.04304             | 2.020757           |
| 22.                          | 10.5       | 0.047924            | 1.13431            | 211.                        | 10.5       | 0.041209            | 1.759463           |
| 23.                          | 11         | 0.034493            | 1.131868           | 212.                        | 11         | 0.048535            | 1.551893           |
| 24.                          | 11.5       | 0.028999            | 1.131868           | 213.                        | 11.5       | 0.047924            | 1.393162           |
| 25.                          | 12         | 0.049145            | 1.131868           | 214.                        | 12         | 0.052808            | 1.302808           |
| 26.                          | 12.5       | 0.041819            | 1.131868           | 215.                        | 12.5       | 0.054029            | 1.229548           |
| 27.                          | 13         | 0.052808            | 1.131868           | 216.                        | 13         | 0.044261            | 1.190476           |
| 28.                          | 13.5       | 0.028999            | 1.13431            | 217.                        | 13.5       | 0.054029            | 1.17094            |
| 29.                          | 14         | 0.044261            | 1.131868           | 218.                        | 14         | 0.039988            | 1.161172           |
| 30.                          | 14.5       | 0.046703            | 1.131868           | 219.                        | 14.5       | 0.036325            | 1.156288           |
| 31.                          | 15         | 0.050977            | 1.129426           | 220.                        | 15         | 0.037546            | 1.156288           |
| 32.                          | 15.5       | 0.15232             | 1.136752           | 221.                        | 15.5       | 0.044872            | 1.153846           |
| 33.                          | 16         | 0.179182            | 1.229548           | 222.                        | 16         | 0.045482            | 1.151404           |
| 34.                          | 16.5       | 0.192613            | 1.520147           | 223.                        | 16.5       | 0.036325            | 1.148962           |
| 35.                          | 17         | 0.192613            | 2.064713           | 224.                        | 17         | 0.047924            | 1.14652            |
| 36.                          | 17.5       | 0.197497            | 2.78022            | 225.                        | 17.5       | 0.044872            | 1.14652            |
| 37.                          | 18         | 0.190781            | 3.456654           | 226.                        | 18         | 0.048535            | 1.144078           |

|     |      |          |          |      |      |          |          |
|-----|------|----------|----------|------|------|----------|----------|
| 38. | 18.5 | 0.187729 | 3.954823 | 227. | 18.5 | 0.051587 | 1.141636 |
| 39. | 19   | 0.191392 | 4.230769 | 228. | 19   | 0.04243  | 1.14652  |
| 40. | 19.5 | 0.179182 | 4.343101 | 229. | 19.5 | 0.038767 | 1.141636 |
| 41. | 20   | 0.180403 | 4.404151 | 230. | 20   | 0.043651 | 1.141636 |
| 42. | 20.5 | 0.190171 | 4.421245 | 231. | 20.5 | 0.043651 | 1.141636 |
| 43. | 21   | 0.195055 | 4.421245 | 232. | 21   | 0.05464  | 1.141636 |
| 44. | 21.5 | 0.185287 | 4.413919 | 233. | 21.5 | 0.032662 | 1.139194 |
| 45. | 22   | 0.179792 | 4.409035 | 234. | 22   | 0.044261 | 1.139194 |
| 46. | 22.5 | 0.179182 | 4.404151 | 235. | 22.5 | 0.037546 | 1.136752 |
| 47. | 23   | 0.186508 | 4.406593 | 236. | 23   | 0.035104 | 1.136752 |
| 48. | 23.5 | 0.181013 | 4.404151 | 237. | 23.5 | 0.038767 | 1.136752 |
| 49. | 24   | 0.198718 | 4.406593 | 238. | 24   | 0.047924 | 1.13431  |
| 50. | 24.5 | 0.178571 | 4.406593 | 239. | 24.5 | 0.046703 | 1.136752 |
| 51. | 25   | 0.182845 | 4.411477 | 240. | 25   | 0.052808 | 1.136752 |
| 52. | 25.5 | 0.184676 | 4.411477 | 241. | 25.5 | 0.044261 | 1.13431  |
| 53. | 26   | 0.187118 | 4.411477 | 242. | 26   | 0.045482 | 1.13431  |
| 54. | 26.5 | 0.179792 | 4.411477 | 243. | 26.5 | 0.047314 | 1.13431  |
| 55. | 27   | 0.184676 | 4.416361 | 244. | 27   | 0.038156 | 1.136752 |
| 56. | 27.5 | 0.181624 | 4.413919 | 245. | 27.5 | 0.038156 | 1.13431  |
| 57. | 28   | 0.188339 | 4.416361 | 246. | 28   | 0.044872 | 1.13431  |
| 58. | 28.5 | 0.174298 | 4.416361 | 247. | 28.5 | 0.04243  | 1.13431  |
| 59. | 29   | 0.192613 | 4.418803 | 248. | 29   | 0.049145 | 1.131868 |
| 60. | 29.5 | 0.178571 | 4.418803 | 249. | 29.5 | 0.053419 | 1.131868 |
| 61. | 30   | 0.173687 | 4.418803 | 250. | 30   | 0.04304  | 1.13431  |
| 62. | 30.5 | 0.181624 | 4.421245 | 251. | 30.5 | 0.039377 | 1.131868 |
| 63. | 31   | 0.187118 | 4.418803 | 252. | 31   | 0.047314 | 1.13431  |
| 64. | 31.5 | 0.184066 | 4.421245 | 253. | 31.5 | 0.04304  | 1.131868 |
| 65. | 32   | 0.184066 | 4.421245 | 254. | 32   | 0.053419 | 1.13431  |
| 66. | 32.5 | 0.192002 | 4.421245 | 255. | 32.5 | 0.050366 | 1.131868 |
| 67. | 33   | 0.180403 | 4.421245 | 256. | 33   | 0.050366 | 1.131868 |
| 68. | 33.5 | 0.181624 | 4.421245 | 257. | 33.5 | 0.039988 | 1.131868 |
| 69. | 34   | 0.190781 | 4.423687 | 258. | 34   | 0.04243  | 1.129426 |
| 70. | 34.5 | 0.182234 | 4.423687 | 259. | 34.5 | 0.041209 | 1.131868 |
| 71. | 35   | 0.185897 | 4.423687 | 260. | 35   | 0.041819 | 1.129426 |
| 72. | 35.5 | 0.171245 | 4.426129 | 261. | 35.5 | 0.047924 | 1.131868 |
| 73. | 36   | 0.18895  | 4.426129 | 262. | 36   | 0.045482 | 1.131868 |
| 74. | 36.5 | 0.185897 | 4.423687 | 263. | 36.5 | 0.044872 | 1.129426 |
| 75. | 37   | 0.179182 | 4.426129 | 264. | 37   | 0.039988 | 1.131868 |
| 76. | 37.5 | 0.187118 | 4.426129 | 265. | 37.5 | 0.050977 | 1.131868 |
| 77. | 38   | 0.181624 | 4.426129 | 266. | 38   | 0.038767 | 1.131868 |
| 78. | 38.5 | -1.25    | 4.423687 | 267. | 38.5 | 0.050977 | 1.131868 |

|      |      |          |          |      |      |          |          |
|------|------|----------|----------|------|------|----------|----------|
| 79.  | 39   | 0.181013 | 4.426129 | 268. | 39   | 0.038767 | 1.129426 |
| 80.  | 39.5 | 0.190171 | 4.426129 | 269. | 39.5 | 0.041209 | 1.131868 |
| 81.  | 40   | 0.179182 | 4.426129 | 270. | 40   | 0.052198 | 1.129426 |
| 82.  | 40.5 | 0.184676 | 4.426129 | 271. | 40.5 | 0.047924 | 1.129426 |
| 83.  | 41   | 0.188339 | 4.426129 | 272. | 41   | 0.038767 | 1.131868 |
| 84.  | 41.5 | 0.184676 | 4.426129 | 273. | 41.5 | 0.044872 | 1.129426 |
| 85.  | 42   | 0.185897 | 4.426129 | 274. | 42   | 0.039377 | 1.129426 |
| 86.  | 42.5 | 0.170635 | 4.426129 | 275. | 42.5 | 0.036935 | 1.131868 |
| 87.  | 43   | 0.177961 | 4.426129 | 276. | 43   | 0.041209 | 1.129426 |
| 88.  | 43.5 | 0.182845 | 4.426129 | 277. | 43.5 | 0.049145 | 1.131868 |
| 89.  | 44   | 0.18895  | 4.426129 | 278. | 44   | 0.047314 | 1.129426 |
| 90.  | 44.5 | 0.188339 | 4.428571 | 279. | 44.5 | 0.04304  | 1.131868 |
| 91.  | 45   | 0.181013 | 4.428571 | 280. | 45   | 0.055861 | 1.129426 |
| 92.  | 45.5 | 0.186508 | 4.428571 | 281. | 45.5 | 0.04243  | 1.131868 |
| 93.  | 46   | 0.182845 | 4.428571 | 282. | 46   | 0.046093 | 1.131868 |
| 94.  | 46.5 | 0.181624 | 4.428571 | 283. | 46.5 | 0.040598 | 1.129426 |
| 95.  | 47   | 0.181624 | 4.428571 | 284. | 47   | 0.05464  | 1.129426 |
| 96.  | 47.5 | 0.185287 | 4.428571 | 285. | 47.5 | 0.039377 | 1.129426 |
| 97.  | 48   | 0.186508 | 4.428571 | 286. | 48   | 0.047924 | 1.131868 |
| 98.  | 48.5 | 0.174298 | 4.431013 | 287. | 48.5 | 0.040598 | 1.129426 |
| 99.  | 49   | 0.183455 | 4.426129 | 288. | 49   | 0.046093 | 1.131868 |
| 100. | 49.5 | 0.17674  | 4.428571 | 289. | 49.5 | 0.054029 | 1.129426 |
| 101. | 50   | 0.186508 | 4.428571 | 290. | 50   | 0.049756 | 1.129426 |
| 102. | 50.5 | 0.181013 | 4.428571 | 291. | 50.5 | 0.052198 | 1.131868 |
| 103. | 51   | 0.182845 | 4.428571 | 292. | 51   | 0.044872 | 1.129426 |
| 104. | 51.5 | 0.176129 | 4.428571 | 293. | 51.5 | 0.052808 | 1.126984 |
| 105. | 52   | 0.173687 | 4.428571 | 294. | 52   | 0.047924 | 1.131868 |
| 106. | 52.5 | 0.187118 | 4.428571 | 295. | 52.5 | 0.038156 | 1.131868 |
| 107. | 53   | 0.187118 | 4.428571 | 296. | 53   | 0.041209 | 1.129426 |
| 108. | 53.5 | 0.179182 | 4.428571 | 297. | 53.5 | 0.036935 | 1.129426 |
| 109. | 54   | 0.18895  | 4.428571 | 298. | 54   | 0.043651 | 1.129426 |
| 110. | 54.5 | 0.190171 | 4.428571 | 299. | 54.5 | 0.047314 | 1.129426 |
| 111. | 55   | 0.179182 | 4.428571 | 300. | 55   | 0.04304  | 1.129426 |
| 112. | 55.5 | 0.191392 | 4.428571 | 301. | 55.5 | 0.039988 | 1.129426 |
| 113. | 56   | 0.184066 | 4.431013 | 302. | 56   | 0.051587 | 1.129426 |
| 114. | 56.5 | 0.183455 | 4.431013 | 303. | 56.5 | 0.039988 | 1.129426 |
| 115. | 57   | 0.187118 | 4.428571 | 304. | 57   | 0.049756 | 1.126984 |
| 116. | 57.5 | 0.17735  | 4.431013 | 305. | 57.5 | 0.041819 | 1.129426 |
| 117. | 58   | 0.188339 | 4.431013 | 306. | 58   | 0.052198 | 1.131868 |
| 118. | 58.5 | 0.179792 | 4.431013 | 307. | 58.5 | 0.047924 | 1.129426 |
| 119. | 59   | 0.191392 | 4.431013 | 308. | 59   | 0.047314 | 1.129426 |

|      |      |          |          |      |      |          |          |
|------|------|----------|----------|------|------|----------|----------|
| 120. | 59.5 | 0.175519 | 4.431013 | 309. | 59.5 | 0.036325 | 1.129426 |
| 121. | 60   | 0.185287 | 4.428571 | 310. | 60   | 0.045482 | 1.129426 |
| 122. | 60.5 | 0.186508 | 4.428571 | 311. | 60.5 | 0.039988 | 1.129426 |
| 123. | 61   | 0.191392 | 4.431013 | 312. | 61   | 0.039377 | 1.129426 |
| 124. | 61.5 | 0.183455 | 4.433455 | 313. | 61.5 | 0.048535 | 1.129426 |
| 125. | 62   | 0.181013 | 4.428571 | 314. | 62   | 0.049145 | 1.129426 |
| 126. | 62.5 | 0.181013 | 4.428571 | 315. | 62.5 | 0.046703 | 1.129426 |
| 127. | 63   | 0.182234 | 4.431013 | 316. | 63   | 0.050366 | 1.129426 |
| 128. | 63.5 | 0.182234 | 4.428571 | 317. | 63.5 | 0.047314 | 1.129426 |
| 129. | 64   | 0.173077 | 4.428571 | 318. | 64   | 0.044872 | 1.129426 |
| 130. | 64.5 | 0.173687 | 4.428571 | 319. | 64.5 | 0.041819 | 1.129426 |
| 131. | 65   | 0.192613 | 4.431013 | 320. | 65   | 0.044261 | 1.129426 |
| 132. | 65.5 | 0.193223 | 4.431013 | 321. | 65.5 | 0.049145 | 1.129426 |
| 133. | 66   | 0.181013 | 4.428571 | 322. | 66   | 0.058303 | 1.131868 |
| 134. | 66.5 | 0.178571 | 4.431013 | 323. | 66.5 | 0.044872 | 1.126984 |
| 135. | 67   | 0.190781 | 4.431013 | 324. | 67   | 0.041819 | 1.129426 |
| 136. | 67.5 | 0.185287 | 4.431013 | 325. | 67.5 | 0.048535 | 1.131868 |
| 137. | 68   | 0.18956  | 4.428571 | 326. | 68   | 0.04243  | 1.129426 |
| 138. | 68.5 | 0.174298 | 4.428571 | 327. | 68.5 | 0.052808 | 1.129426 |
| 139. | 69   | 0.181624 | 4.428571 | 328. | 69   | 0.052808 | 1.129426 |
| 140. | 69.5 | 0.185287 | 4.428571 | 329. | 69.5 | 0.046703 | 1.129426 |
| 141. | 70   | 0.180403 | 4.431013 | 330. | 70   | 0.047314 | 1.129426 |
| 142. | 70.5 | 0.183455 | 4.431013 | 331. | 70.5 | 0.051587 | 1.129426 |
| 143. | 71   | 0.188339 | 4.431013 | 332. | 71   | 0.047314 | 1.129426 |
| 144. | 71.5 | 0.187118 | 4.428571 | 333. | 71.5 | 0.035714 | 1.129426 |
| 145. | 72   | 0.187118 | 4.431013 | 334. | 72   | 0.052198 | 1.129426 |
| 146. | 72.5 | 0.185897 | 4.431013 | 335. | 72.5 | 0.045482 | 1.129426 |
| 147. | 73   | 0.184066 | 4.431013 | 336. | 73   | 0.048535 | 1.129426 |
| 148. | 73.5 | 0.184676 | 4.428571 | 337. | 73.5 | 0.043651 | 1.129426 |
| 149. | 74   | 0.185897 | 4.431013 | 338. | 74   | 0.04304  | 1.129426 |
| 150. | 74.5 | 0.181013 | 4.431013 | 339. | 74.5 | 0.039988 | 1.126984 |
| 151. | 75   | 0.192002 | 4.428571 | 340. | 75   | 0.035104 | 1.131868 |
| 152. | 75.5 | 0.180403 | 4.431013 | 341. | 75.5 | 0.034493 | 1.129426 |
| 153. | 76   | 0.184066 | 4.428571 | 342. | 76   | 0.037546 | 1.129426 |
| 154. | 76.5 | 0.17674  | 4.431013 | 343. | 76.5 | 0.050977 | 1.129426 |
| 155. | 77   | 0.175519 | 4.428571 | 344. | 77   | 0.039988 | 1.129426 |
| 156. | 77.5 | 0.186508 | 4.431013 | 345. | 77.5 | 0.038767 | 1.129426 |
| 157. | 78   | 0.182845 | 4.428571 | 346. | 78   | 0.049145 | 1.129426 |
| 158. | 78.5 | 0.181013 | 4.431013 | 347. | 78.5 | 0.046703 | 1.129426 |
| 159. | 79   | 0.179792 | 4.431013 | 348. | 79   | 0.038156 | 1.129426 |
| 160. | 79.5 | 0.181624 | 4.431013 | 349. | 79.5 | 0.044261 | 1.129426 |

|      |      |          |          |      |      |          |          |
|------|------|----------|----------|------|------|----------|----------|
| 161. | 80   | 0.181624 | 4.431013 | 350. | 80   | 0.04243  | 1.129426 |
| 162. | 80.5 | 0.187118 | 4.431013 | 351. | 80.5 | 0.052198 | 1.129426 |
| 163. | 81   | 0.181013 | 4.428571 | 352. | 81   | 0.04243  | 1.129426 |
| 164. | 81.5 | 0.185287 | 4.428571 | 353. | 81.5 | 0.047924 | 1.129426 |
| 165. | 82   | 0.181624 | 4.431013 | 354. | 82   | 0.039377 | 1.131868 |
| 166. | 82.5 | 0.192002 | 4.428571 | 355. | 82.5 | 0.049756 | 1.129426 |
| 167. | 83   | 0.190781 | 4.431013 | 356. | 83   | 0.033883 | 1.129426 |
| 168. | 83.5 | 0.176129 | 4.428571 | 357. | 83.5 | 0.046703 | 1.129426 |
| 169. | 84   | 0.17674  | 4.433455 | 358. | 84   | 0.04304  | 1.129426 |
| 170. | 84.5 | 0.190781 | 4.431013 | 359. | 84.5 | 0.057692 | 1.131868 |
| 171. | 85   | 0.184676 | 4.431013 | 360. | 85   | 0.050366 | 1.129426 |
| 172. | 85.5 | 0.18956  | 4.431013 | 361. | 85.5 | 0.04304  | 1.129426 |
| 173. | 86   | 0.181013 | 4.428571 | 362. | 86   | 0.039377 | 1.129426 |
| 174. | 86.5 | 0.187118 | 4.428571 | 363. | 86.5 | 0.047314 | 1.129426 |
| 175. | 87   | 0.193223 | 4.431013 | 364. | 87   | 0.040598 | 1.131868 |
| 176. | 87.5 | 0.180403 | 4.431013 | 365. | 87.5 | 0.046703 | 1.129426 |
| 177. | 88   | 0.190781 | 4.433455 | 366. | 88   | 0.047314 | 1.129426 |
| 178. | 88.5 | 0.183455 | 4.431013 | 367. | 88.5 | 0.049756 | 1.131868 |
| 179. | 89   | 0.184066 | 4.431013 | 368. | 89   | 0.050977 | 1.129426 |
| 180. | 89.5 | 0.179182 | 4.431013 | 369. | 89.5 | 0.051587 | 1.129426 |
| 181. | 90   | 0.184676 | 4.431013 | 370. | 90   | 0.052808 | 1.129426 |
| 182. | 90.5 | 0.174908 | 4.428571 | 371. | 90.5 | 0.038767 | 1.129426 |
| 183. | 91   | 0.190171 | 4.431013 | 372. | 91   | 0.047314 | 1.129426 |
| 184. | 91.5 | 0.178571 | 4.428571 | 373. | 91.5 | 0.038767 | 1.129426 |
| 185. | 92   | 0.181624 | 4.431013 | 374. | 92   | 0.041819 | 1.129426 |
| 186. | 92.5 | 0.179182 | 4.428571 | 375. | 92.5 | 0.046093 | 1.131868 |
| 187. | 93   | 0.179182 | 4.431013 | 376. | 93   | 0.055861 | 1.129426 |
| 188. | 93.5 | 0.192002 | 4.431013 | 377. | 93.5 | 0.04304  | 1.129426 |
| 189. | 94   | 0.183455 | 4.431013 | 378. | 94   | 0.052198 | 1.131868 |
|      |      |          |          | 379. | 94.5 | 0.040598 | 1.129426 |
|      |      |          |          | 380. | 95   | 0.044261 | 1.129426 |
|      |      |          |          | 381. | 95.5 | 0.033883 | 1.129426 |
|      |      |          |          | 382. | 96   | 0.046703 | 1.129426 |
|      |      |          |          | 383. | 96.5 | 0.046093 | 1.129426 |
|      |      |          |          | 384. | 97   | 0.047314 | 1.129426 |
|      |      |          |          | 385. | 97.5 | 0.040598 | 1.126984 |
|      |      |          |          | 386. | 98   | 0.053419 | 1.129426 |
|      |      |          |          | 387. | 98.5 | 0.039377 | 1.129426 |
|      |      |          |          | 388. | 99   | 0.038156 | 1.129426 |
|      |      |          |          | 389. | 99.5 | 0.056471 | 1.129426 |
|      |      |          |          | 390. | 100  | 0.036325 | 1.129426 |

## Anexo 38. Programa 1 que prepara los datos medidos para procesarlos (prepdatosident.m)

```
%Programa para preparar los datos medidos
en los tres experimentos
%realizados.
clear
clc
%Datos estimación Experimento 1.
%subida
load Prueba1Exp1.dat
tiempo1=Prueba1Exp1(:,1)/1000;
Voltinp1=Prueba1Exp1(:,2);
Voltioutp1=Prueba1Exp1(:,3);
%Bajada
load Prueba2Exp1.dat
tiempo2=[80000:500:139000]'/1000;
Voltinp2=Prueba2Exp1(:,2);
Voltioutp2=Prueba2Exp1(:,3);
disp('Cargado datos del experimento 1')

%Datos estimación Experimento 2.
%Subida
load Prueba3Exp2.dat
tiempo2aval=Prueba3Exp2(:,1)/1000;
Voltinp1aval=Prueba3Exp2(:,2);
Voltioutp1aval=Prueba3Exp2(:,3);
%Bajada
load Prueba4Exp2.dat
tiempo2bval=Prueba4Exp2(:,1)/1000;
Voltinp2bval=Prueba4Exp2(:,2);
Voltioutp2bval=Prueba4Exp2(:,3);
disp('Cargado datos del experimento 2')

%Datos validación Experimento 3.
%Subida
load Prueba5Exp3.dat
tiempo1val=Prueba5Exp3(:,1)/1000;
Voltinp1val=Prueba5Exp3(:,2);
Voltinp1val(78)=0.1813;
Voltioutp1val=Prueba5Exp3(:,3);
%Bajada
load Prueba6Exp3.dat
tiempo2val=[94500:500:194500]'/1000;
Voltinp2val=Prueba6Exp3(:,2);
Voltioutp2val=Prueba6Exp3(:,3);
disp('Cargado datos del experimento 3')
```

|                |                |
|----------------|----------------|
| Prueba1Exp1    | <160x3 double> |
| Prueba2Exp1    | <119x3 double> |
| Prueba3Exp2    | <134x3 double> |
| Prueba4Exp2    | <92x3 double>  |
| Prueba5Exp3    | <189x3 double> |
| Prueba6Exp3    | <201x3 double> |
| Voltinp1       | <160x1 double> |
| Voltinp1aval   | <134x1 double> |
| Voltinp1val    | <189x1 double> |
| Voltinp2       | <119x1 double> |
| Voltinp2bval   | <92x1 double>  |
| Voltinp2val    | <201x1 double> |
| Voltioutp1     | <160x1 double> |
| Voltioutp1aval | <134x1 double> |
| Voltioutp1val  | <189x1 double> |
| Voltioutp2     | <119x1 double> |
| Voltioutp2bval | <92x1 double>  |
| Voltioutp2val  | <201x1 double> |
| tiempo1        | <160x1 double> |
| tiempo1val     | <189x1 double> |
| tiempo2        | <119x1 double> |
| tiempo2aval    | <134x1 double> |
| tiempo2bval    | <92x1 double>  |
| tiempo2val     | <201x1 double> |



prepdatosident.m

## Anexo 39. Programa 2 que prepara los datos para identificar (progrident.m)

```
%Este es el fichero que prepara los datos
para la identificación
%con el experimento 1, 2, 3
%tiempo1 en segundos.
%Voltinpl1 voltaje de entrada en V;
%Voltpoutp1 voltaje de salida en V;
%tiempo2 en segundos.
%Voltinpl2 voltaje de entrada en V;
%Voltpoutp2 voltaje de salida en V;
%Datos para validación del Experimento 1
%Datos para estimación
tiempo=[tiempo1;tiempo2];
Voltinpl=[Voltinpl1;Voltinpl2];
Voltpoutp=[Voltpoutp1;Voltpoutp2];
subplot(2,1,1),...
    plot(tiempo,Voltinpl,'b','LineWidth',2
),...
    grid,...
    ylabel('Voltaje de entrada ( V )'),...
    title('Datos del Experimento 1'),...
h = legend('Entrada (V)',2);
subplot(2,1,2),...

plot(tiempo,Voltpoutp,'r','LineWidth',2),...
.
    grid,...
    ylabel('Voltaje de salida ( V )'),...
    xlabel('Tiempo ( s )')
h = legend('Salida (V)',2);
n=input('Presione enter para continuar');

%Restando la componente de offset
Voltinpl=Voltinpl-mean(Voltinpl(1:33));
Voltpoutp=Voltpoutp-mean(Voltpoutp(1:33));
subplot(2,1,1),...

plot(tiempo,Voltinpl,'b','LineWidth',2),...
    title('Datos del Experimento 1 para
estimación'),...
    grid,...
    ylabel('Voltaje de entrada ( V )'),...
    h = legend('Entrada (V)',2);
subplot(2,1,2),...

plot(tiempo,Voltpoutp,'r','LineWidth',2),...
.
    grid,...
    ylabel('Voltaje de salida ( V )'),...
    xlabel('Tiempo ( s )')
h = legend('Salida (V)',2);
n=input('Presione enter para continuar');

%Datos para validación del Experimento 3
%Datos para validación
tiempo2val=[tiempo1val;tiempo2val];
Voltinplval=[Voltinpl1val;Voltinpl2val];
Voltpoutpval=[Voltpoutp1val;Voltpoutp2val];
subplot(2,1,1),...

plot(tiempo2val,Voltinplval,'b','LineWidth',2
),...
    grid,...
    ylabel('Voltaje de entrada ( V )'),...
    title('Datos del Experimento 3'),...
    h = legend('Entrada (V)',2);
subplot(2,1,2),...

plot(tiempo2val,Voltpoutpval,'r','LineWidth'
,2),...
```

```

tiempo2=[tiempo2aval;tiempo2bval];
Voltinp2=[Voltinplaval;Voltinp2bval];
Voltioutp2=[Voltioutplaval;Voltioutp2bval];
subplot(2,1,1),...

plot(tiempo2,Voltinp2,'b','LineWidth',2),...
.
    title('Datos del Experimento 2 para
plot(tiempo2,Voltinp2,'b','LineWidth',2
),...
    grid,...
    ylabel('Voltaje de entrada ( V )'),...
    title('Datos del Experimento 3'),...
h = legend('Entrada (V)',2);
subplot(2,1,2),...

plot(tiempo2,Voltioutp2,'r','LineWidth'
,2),...
    grid,...
    ylabel('Voltaje de salida ( V )'),...
    xlabel('Tiempo ( s )')
h = legend('Salida (V)',2);
n=input('Presione enter para continuar')
%Preparando datos para el filtrado en
simulink.
datosinp=[tiempo Voltinp];
datosout=[tiempo Voltioutp];
    grid,...
    ylabel('Voltaje de salida ( V )'),...
    xlabel('Tiempo ( s )')
h = legend('Salida (V)',2);
n=input('Presione enter para continuar')

%Restando la componente de offset en los
datos de validación
Voltinpval=Voltinpval-
mean(Voltinpval(1:31));
Voltioutpval=Voltioutpval-
mean(Voltioutpval(1:31));
subplot(2,1,1),...

```



progident.m

## Anexo 40. Programa 3 que prepara los datos para identificar (progidentcont.m)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre>%Area de captura de datos del simulink Scope Voltinpfilt1=Voltinpfilt(:,2); Voltioutpfilt1=Voltioutpfilt(:,2); %Area de datos en la forma de iddata Ts = 0.5; % Sampling interval is 0.5 s ze = iddata(Voltioutpfilt1,Voltinpfilt1,Ts); zv = iddata(Voltioutpval,Voltinpfval,Ts); % Set time units to minutes ze.TimeUnit = 's'; % Set names of input channels ze.InputName = 'Voltaje entrada'; % Set units for input variables ze.InputUnit = 'V'; % Set name of output channel ze.OutputName = 'Voltaje salida'; % Set unit of output channel ze.OutputUnit = 'V'; % Set validation data properties zv.TimeUnit = 's'; zv.InputName = 'Voltaje entrada'; zv.InputUnit = 'V'; zv.OutputName = 'Voltaje salida'; zv.OutputUnit = 'V'; %Para verificar %Este fichero es continuación del anterior clc %Pregunar: Voltaje de entrada y salida del Experimento 1 plot(ze,'r','LineWidth',2) grid,... title('Voltaje de Entrada y Salida filtrado Experimento 1'),... ylabel('Voltaje de entrada ( V )'),... xlabel('Tiempo ( s )') h = legend('Entrada (V)',2); n=input('Presione enter para continuar');  %Pregunar: Voltaje de entrada y salida del Experimento 1 plot(zv,'b','LineWidth',2) grid,... plot(tiempoval,Voltioutpval,'b','LineWidth' ,2) grid,... ylabel('Voltaje de entrada ( V )'),... xlabel('Tiempo ( s )') title('Datos del Experimento 1'),... h = legend('Salida (V)',3); n=input('Presione enter para continuar'); step(ze) %</pre> | <pre>%Estimando el orden del modelo. na=[1:4]; nb=[1:4]; nk=[1:3]; NN1 = struc(na,nb,nk); selstruc(arxstruc(ze,zv,NN1)) n=input('Presione enter para continuar'); % disp('Este es el modelo ARX para el mejor segundo ajuste segun los dos criterios,azul') disp('na=4,nb=2,nk=1') marx1 = arx(ze,'na',4,'nb',2,'nk',1); present(marx1) %disp('La Función de Transferencia es:') %sys = tf(marx1) %roots(marx1.a) disp('') % disp('Este es el modelo ARX para el mejor ajuste,rojo') disp('na=4,nb=4,nk=1') marx2 = arx(ze,'na',4,'nb',4,'nk',1); present(marx2) %roots(marx2.a) disp('') % disp('Este es el modelo ARX para el tercer mejor ajuste') disp('na=4,nb=3,nk=2') marx3 = arx(ze,'na',4,'nb',3,'nk',2); present(marx3) disp('') %roots(marx3.a) % disp('Este es el modelo ARX inventado') disp('na=1,nb=1,nk=1') marx4 = arx(ze,'na',1,'nb',1,'nk',1); present(marx4) disp('') %roots(marx4.a) % disp('Este es el modelo ARX marx5') disp('na=4,nb=1,nk=1') marx5 = arx(ze,'na',4,'nb',1,'nk',1); present(marx5) disp('') %</pre> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

```
disp('Este es el modelo ARX marx6')
disp('na=2,nb=1,nk=1')
marx6 = arx(ze,'na',2,'nb',1,'nk',1);
present(marx6)
disp('')
%
disp('Este es el modelo ARX marx7')
disp('na=2,nb=2,nk=1')
marx7 = arx(ze,'na',2,'nb',2,'nk',1);
present(marx7)
disp('')
%
disp('Este es el modelo ARX marx8')
disp('na=3,nb=1,nk=1')
marx8 = arx(ze,'na',3,'nb',1,'nk',1);
present(marx8)
disp('')
```



progidentcont.m

**Anexo 41. Programa 4 para validar los modelos (valIdent.m)**

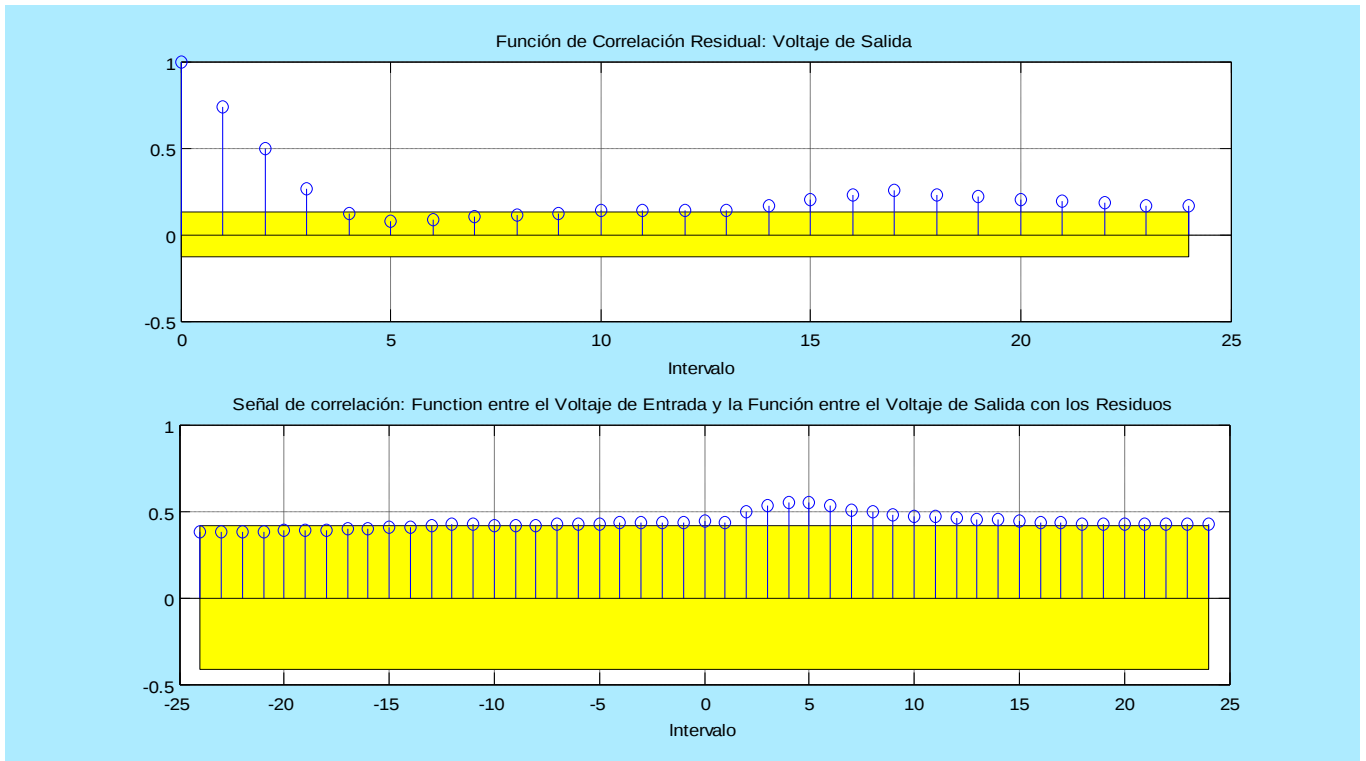
```
%Este fichero es para validar el modelo.
compare(zv,marx1,marx2,marx3,marx4)
n=input('Presione enter para continuar');
compare(zv,marx5,marx6,marx7,marx8)
n=input('Presione enter para continuar');
compare(zv,marx2,marx4,marx7)
n=input('Presione enter para continuar');
resid(zv,marx4)
n=input('Presione enter para continuar marx4');
predict(marx4,zv)
grid
n=input('Presione enter para continuar');
pe(marx4,zv)
grid
%-----
n=input('Presione enter para continuar marx7');
resid(zv,marx7)
n=input('Presione enter para continuar marx7');
predict(marx7,zv)
grid
n=input('Presione enter para continuar');
pe(marx7,zv)
grid
%-----
%Probando con un armax
n=input('Presione enter para continuar');
armax1=armax(ze,'na',1,'nb',1,'nk',1,'nc',1);
present(armax1)
compare(zv,armax1,marx4)
n=input('Presione enter para continuar');
resid(zv,armax1)

disp('Modelo arx en FT')
marx4c=thd2thc(marx4);
[num4,den4]=th2tf(marx4c);
sysarx4=tf(num4,den4)
disp('')
disp('Modelo armax en FT')
armax1c=thd2thc(armax1);
[num1,den1]=th2tf(armax1c);
sysarmax1=tf(num1,den1)
disp('fin')
```

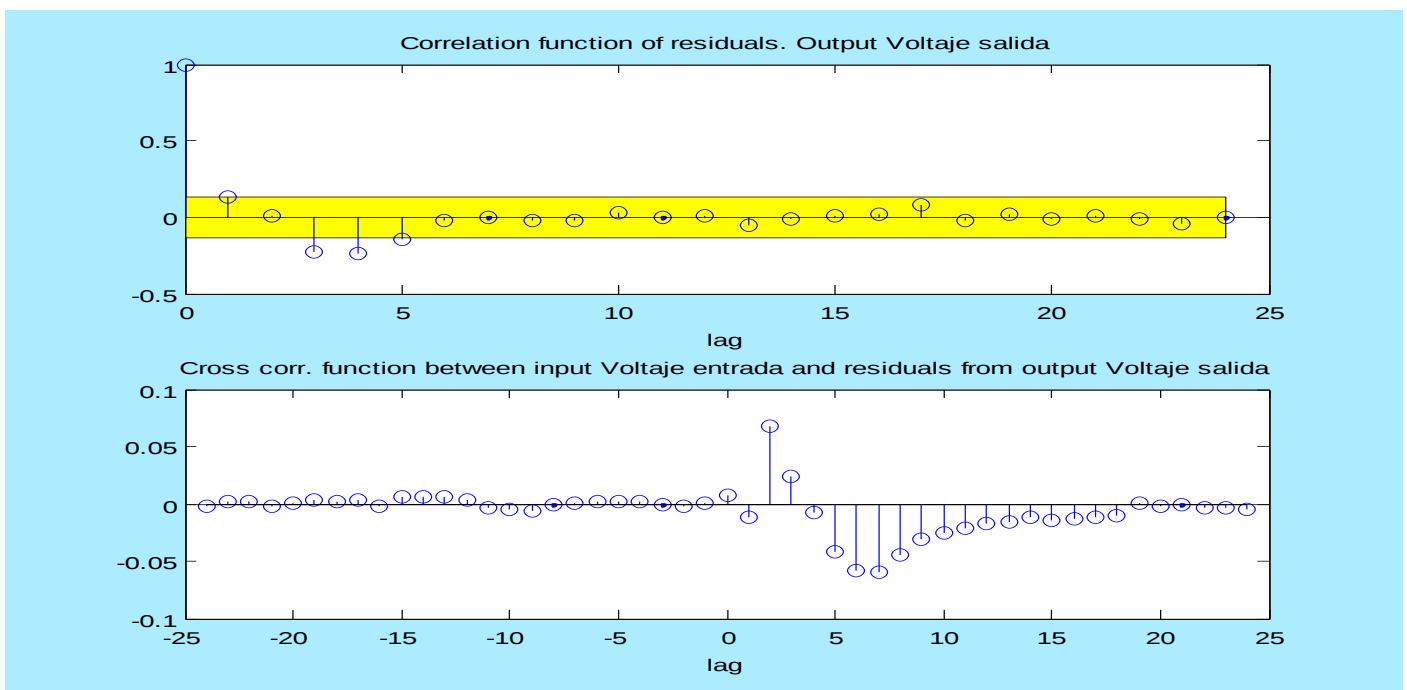


ValIdent.m

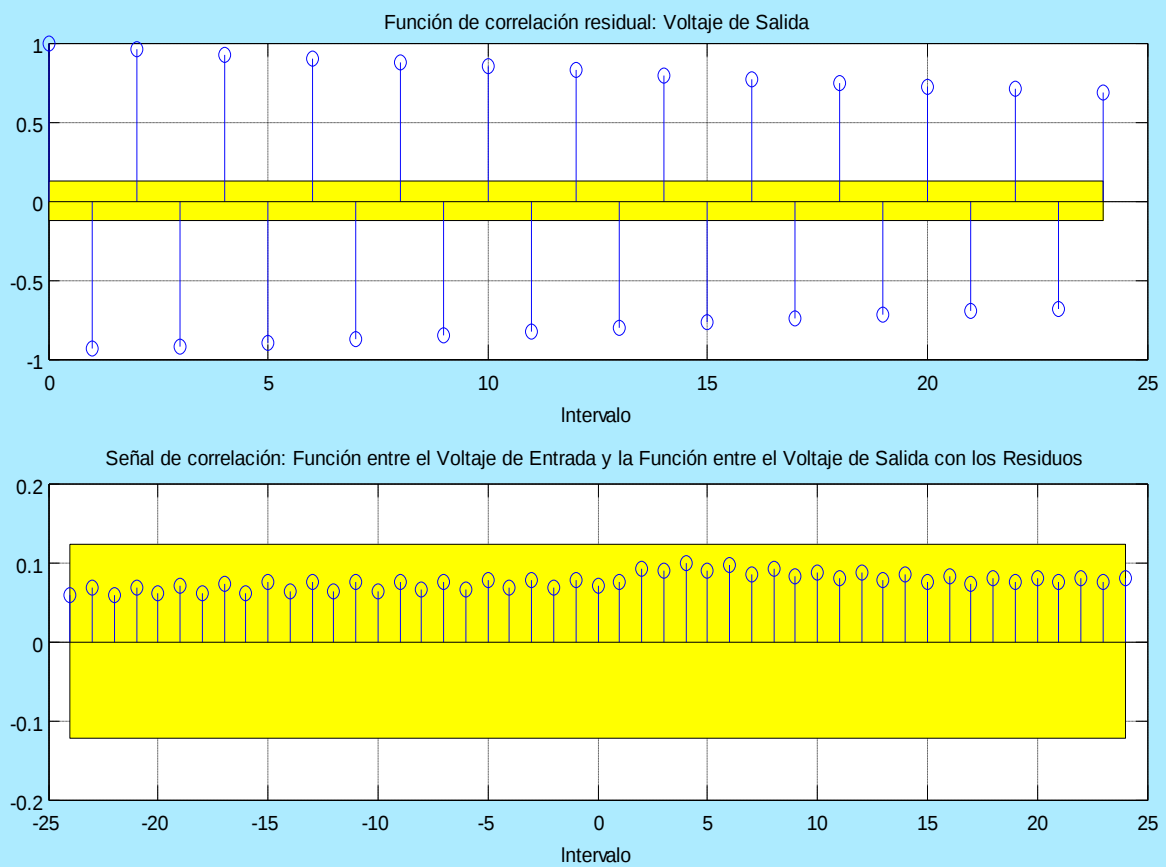
## Anexo 42. Análisis de la correlación y los residuos para el modelo ARX (marx4)



## Anexo 43. Análisis de la correlación y los residuos para el modelo ARX (marx7).



## Anexo 44. Análisis de la correlación y los residuos para el modelo ARMAX



**Anexo 45. Programa 5 que prepara los datos para identificar (escalón arriba)**

|                                          |                                              |
|------------------------------------------|----------------------------------------------|
| % MEDICIONES DINÁMICAS DE VOLTAGE CONTRA | 44.237                                       |
| CAMPO MAGNÉTICO EN EL TIEMPO             | 44.261                                       |
| %SUBIENDO                                | 44.261                                       |
| %Experimento3: Prueba1.txt               | 44.237                                       |
| clear;                                   | 44.261                                       |
| clc                                      | 44.261                                       |
|                                          | 44.261                                       |
| ts=0.5; % tiempo de muestreo en seg.     | 44.237                                       |
| %VECTOR ENTRADA VOLTAJE mV               | 44.261                                       |
|                                          | 44.261                                       |
| %LAS MEDICIONES DE CAMPO ESTÁN EN V      | 44.261                                       |
| y=[11.319                                | 44.261                                       |
| %11.343                                  | 44.261                                       |
| %11.319                                  | 44.261                                       |
| %11.319                                  | 44.261                                       |
| %11.294                                  | 44.261                                       |
| %11.368                                  | 44.261                                       |
| 12.295                                   | 44.261                                       |
| 15.201                                   | 44.261                                       |
| 20.647                                   | 44.286                                       |
| 27.802                                   | 44.286                                       |
| 34.567                                   | 44.286                                       |
| 39.548                                   | 44.286                                       |
| 42.308                                   | 44.286                                       |
| 43.431                                   | 44.286                                       |
| 44.042                                   | 44.286                                       |
| 44.212                                   | 44.286                                       |
| 44.212                                   | 44.310                                       |
| 44.139                                   | 44.261                                       |
| 44.090                                   | 44.286                                       |
| 44.042                                   | 44.286                                       |
| 44.066                                   | 44.286                                       |
| 44.042                                   | 44.286                                       |
| 44.066                                   | 44.286                                       |
| 44.066                                   | 44.286                                       |
| 44.115                                   | 44.286                                       |
| 44.115                                   | 44.286];                                     |
| 44.115                                   | y=0.1*y;                                     |
| 44.164                                   |                                              |
| 44.139                                   | y0=y(1); % Valor inicial de la salida        |
| 44.164                                   | dy=y-y0; % Valores de la salida desviaciones |
| 44.164                                   | % Cantidad de mediciones seleccionadas       |
| 44.188                                   | % dy=-dy;                                    |
| 44.188                                   | % Se construye el escalón                    |
| 44.188                                   | n=length(y);                                 |
| 44.212                                   | u=0.18*ones(n,1); % ancho del escalón        |
| 44.188                                   | i=0:n-1;                                     |
| 44.212                                   | t=i*ts;                                      |
| 44.212                                   | %u=u-0.05                                    |
| 44.212                                   | subplot(2,1,1),...                           |
| 44.212                                   | plot(t,u,'b','LineWidth',2);                 |
| 44.212                                   | grid,...                                     |

|                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 44.237<br>44.237<br>ylabel('Señal de entrada ( V ) '),...<br>subplot(2,1,2),...<br>plot(t,dy,'r','LineWidth',2),...<br>grid,...<br>xlabel('Tiempo ( s ) '),...<br>ylabel('Desviación de la entrada ( V ) ' ) , . . .<br>subida'),... | %axis([0 40 0 0.02]),...<br>title('Mediciones del Experimento 3: Escalón de<br><br><br>Exp3arriba40.m |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11.343<br>11.368<br>%axis([0 40 0 0.02]),...<br>title('Mediciones Experimento 3: Escalón de bajada'),...<br>ylabel('Señal de salida ( V ) '),...<br>subplot(2,1,2),...<br>plot(t,dy,'r','LineWidth',2),...<br>grid,...<br>xlabel('Tiempo ( s ) '),...<br>ylabel('Desviación de la salida ( V ) '),... | grid,...<br><br><br>Exp3abajo40.m |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## Anexo 47. Programa 7 para obtener los modelos y graficar estructuras

```
% Archivo IdenOsbeida.m
% Calcula los parametros del modelo propuesto empleando las
% funciones del toolbox de identificación
disp('Comienzo');
[m n]=size(dy);
x=0:m-1;

plot(t,u,'b',t,dy,'r','LineWidth',2);
grid,...
h = legend('Escalón (t,u)','Salida en desviaciones (t,dy)',2);
plot(x,u,'b',x,dy,'r','LineWidth',2); % Se grafican los datos de entrada y salida
grid,...
h = legend('Escalón (x,u)','Salida en desviaciones (x,dy)',2);
%

% Tiempo de muestreo en seg.
ts=0.5;
% Selección de las estructuras ARX
na=1; nb=1; nk=1;
disp('Este es el modelo ARX na=1; nb=1; nk=1')
%na=2; nb=1; nk=1;
%disp('Este es el modelo ARX na=2; nb=1; nk=1')
%na=3; nb=1; nk=1;
%disp('Este es el modelo ARX na=3; nb=1; nk=1')
%na=4; nb=1; nk=1;
%disp('Este es el modelo ARX na=4; nb=1; nk=1')
%

thetad = arx([dy u],[na nb nk]); % Calcula la matriz Theta
%thetad = armax([dy u],[2 2 2 1]); % Calcula la matriz Theta
present(thetad) %Para ver los parámetros del modelo discreto
thetad = sett(thetad,ts); % Se añade el tiempo de muestreo
thetac = thd2thc(thetad); % Se obtiene la theta del modelo continuo
[N,D] = th2tf(thetac); % Se obtienen el Num y Den de la FT(s)
disp('Modelo continuo')
sisc=tf(N,D) % Se construye la FT(s)
sisczpk=zpk(sisc)
pause
disp(' Para continuar dar return ')
disp('Modelo discreto')
sisd=c2d(sisc,ts) % Se obtiene el modelo discreto FT(z)
sisdzpk=zpk(sisd)
t=0:ts:m*ts-ts;
ym=lsim(sisc,u,t);
r=[zeros(1,nk) ones(1,m-nk)];
ymr=ym'.*r;
ymr=ymr';
%ym=[0 0 ym'];
%ym=[];
%ym=ym';
plot(t,u,'m',t,dy,'r',t,ymr,'b','LineWidth',2);
grid;
```

```
ylabel('Voltaje de salida ( V )'),...
xlabel('Tiempo ( s )'),...
title('Mediciones del Experimento 3'),...
h = legend('Escalón (t,u)','Salida en
desviaciones (t,dy)','Salida del modelo
(t,ymr)',2);
disp('Error cuadrático medio')
ecm=var(ym-y)
disp('Desviación estandard del error')
estd=std(ym-dy)
disp('Maximo error absoluto')
maxerr=max(abs(ym-dy))
```



IdenOsbeida40.m

**Anexo 48. Programa 8 para obtener la mejor estructura**

```
% Archivo verimodOsbeida.m
% Verifica el ajuste de un modelo comparando su salida con las mediciones
% tomadas del sistema real
clc
% Tomar del workspace los vectores de mediciones de entrada y salida en
% desviaciones
u;
dy;
m=length(dy);
x=0:m-1;
%plot(x,u,x,dy); % Se grafican los datos de entrada y salida
%grid;
ts=0.5; % Tiempo de muestreo en seg.
%-----
% Modelo identificado por arx
%disp('Escalón de Subida: Este es el modelo ARX na=2; nb=1; nk=1')
%sisctf=tf([2.32 9.971],[1 0.9023 0.5495])
%-----
%Modelo tanteado
disp('Escalón de Subida: Este es el modelo ARX (tanteado) na=2; nb=1; nk=1')
sisctf=tf([9.97],[1 1.1 0.55])
nk=1 % Retraso de transpote
%-----
% Modelo en polos y ceros
sisctf=zpk(sisctf)
disp(' Para continuar dar Return ')
pause
%t=0:ts:(m-1-nk)*ts;
t=0:ts:(m-1)*ts;
ym=lsim(sisctf,u,t);
% ymr=[zeros(nk-1,0)] ym]
%Graficando ARX
plot(t,u,'m',t,dy,'r',t,ymr,'b','LineWidth',2);
grid;
ylabel('Voltaje de salida ( V )',...
xlabel('Tiempo ( s )',...
title('Experimento 3: modelo ARX na=2; nb=1; nk=1'),...
h = legend('Escalón (t,u)','Salida en desviaciones (t,dy)','Salida del modelo (t,ymr)',2);
disp('Desviación estandar del error')
estd=std(ym-dy)
disp('Maximo error absoluto')
maxerr=max(abs(ym-dy))
```



verimodOsbeida40.m

**Anexo 49. Experimento 3: escalón de subida**

| Escalón | Estructura | Orden |   | Parámetros |    |    | GANANCIA |
|---------|------------|-------|---|------------|----|----|----------|
| Subida  | ARX        | N     | D | na         | nb | nk |          |
| SEXP3   | ARX        | 1     | 2 | 2          | 1  | 1  |          |
| BEXP3   | ARX        | 1     | 2 | 2          | 1  | 1  |          |

$$Ganancia = \frac{9.971}{0.5495} = 18,14558689717925 \approx 18.15$$

$$Ganancia = \frac{4.538}{0.2501} = 18,14474210315874 \approx 18.14$$

**ESCALÓN DE SUBIDA**

na=2; nb=1; nk=1;

Discrete-time IDPOLY model:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$   
 $A(q) = 1 - 1.528 (+0.03163) q^{-1} + 0.6369 (+0.02704) q^{-2}$

$B(q) = 1.983 (+0.1202) q^{-1}$

Estimated using ARX

Loss function 0.000637097 and FPE 0.000689461

Sampling interval: 1

Modelo continuo

Transfer function:

$$\frac{2.332 s + 9.971}{s^2 + 0.9023 s + 0.5495}$$

$$\frac{s^2 + 0.9023 s + 0.5495}{s^2 + 0.9023 s + 0.5495}$$

Zero/pole/gain:

$$2.3318 (s+4.276)$$

$$(s^2 + 0.9023s + 0.5495)$$

Transfer function:

$$\frac{1.983 z + 2.202e-016}{z^2 - 1.528 z + 0.6369}$$

$$z^2 - 1.528 z + 0.6369$$

Sampling time: 0.5

Zero/pole/gain:

$$1.9835 z$$

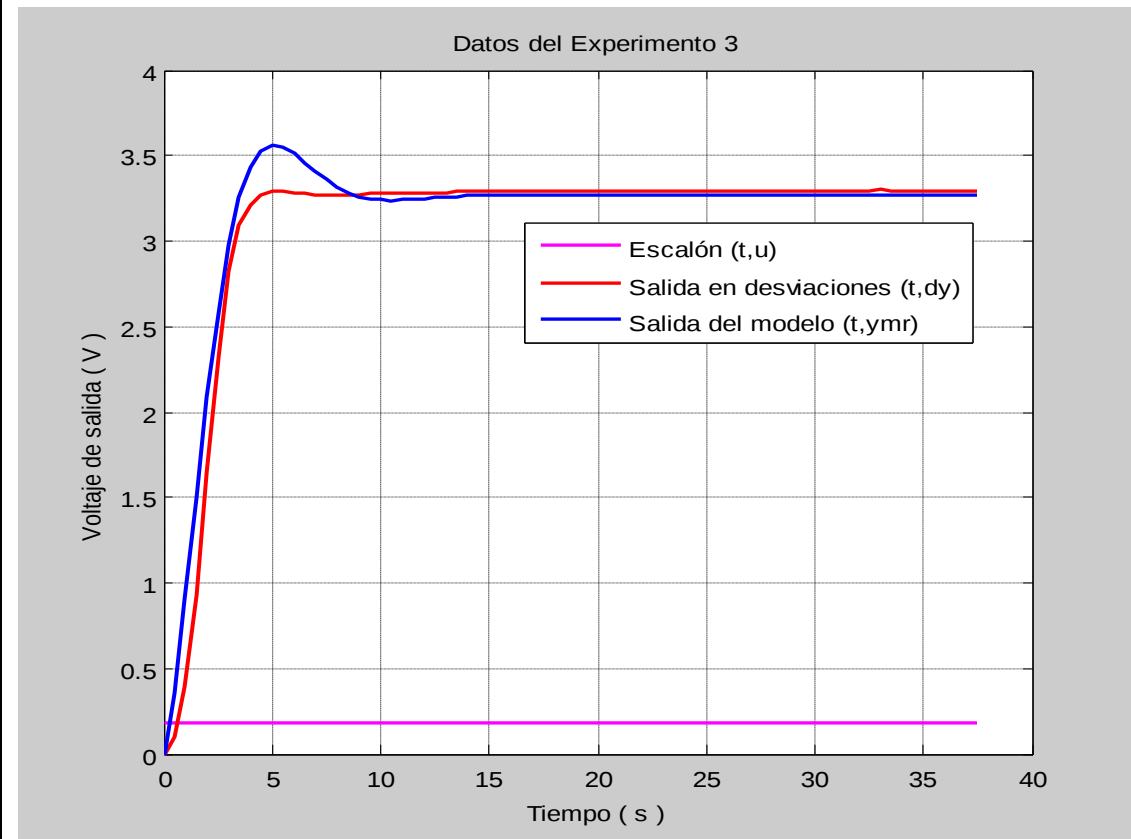
$$(z^2 - 1.528z + 0.6369)$$

Sampling time: 0.5

**ESCALÓN DE SUBIDA**

na=2; nb=1; nk=1;

| Desviación estándar | Error cuadrático medio | Máximo error absoluto |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 0.0175              | 0.1324                 | 0.5754                |



## Anexo 50. Experimento 3: escalón de bajada

### ESCALÓN DE BAJADA

na=2; nb=1; nk=1;

Discrete-time IDPOLY model:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$   
 $A(q) = 1 - 1.661 (+0.02039) q^{-1} + 0.7138 (+0.01833) q^{-2}$

$B(q) = 0.958 (+0.05042) q^{-1}$

Estimated using ARX

Loss function 0.000132819 and FPE 0.000143305

Sampling interval: 1

Created: 28-Mar-2015 21:50:41

Last modified: 28-Mar-2015 21:50:41

Modelo continuo

Transfer function:

$1.076 s + 4.538$

-----  
 $s^2 + 0.6743 s + 0.2501$

Zero/pole/gain:

$1.0763 (s+4.216)$

-----  
 $(s^2 + 0.6743s + 0.2501)$

Modelo discreto

Transfer function:

$0.958 z - 3.191e-016$

-----  
 $z^2 - 1.661 z + 0.7138$

Sampling time: 0.5

Zero/pole/gain:

$0.95801 z$

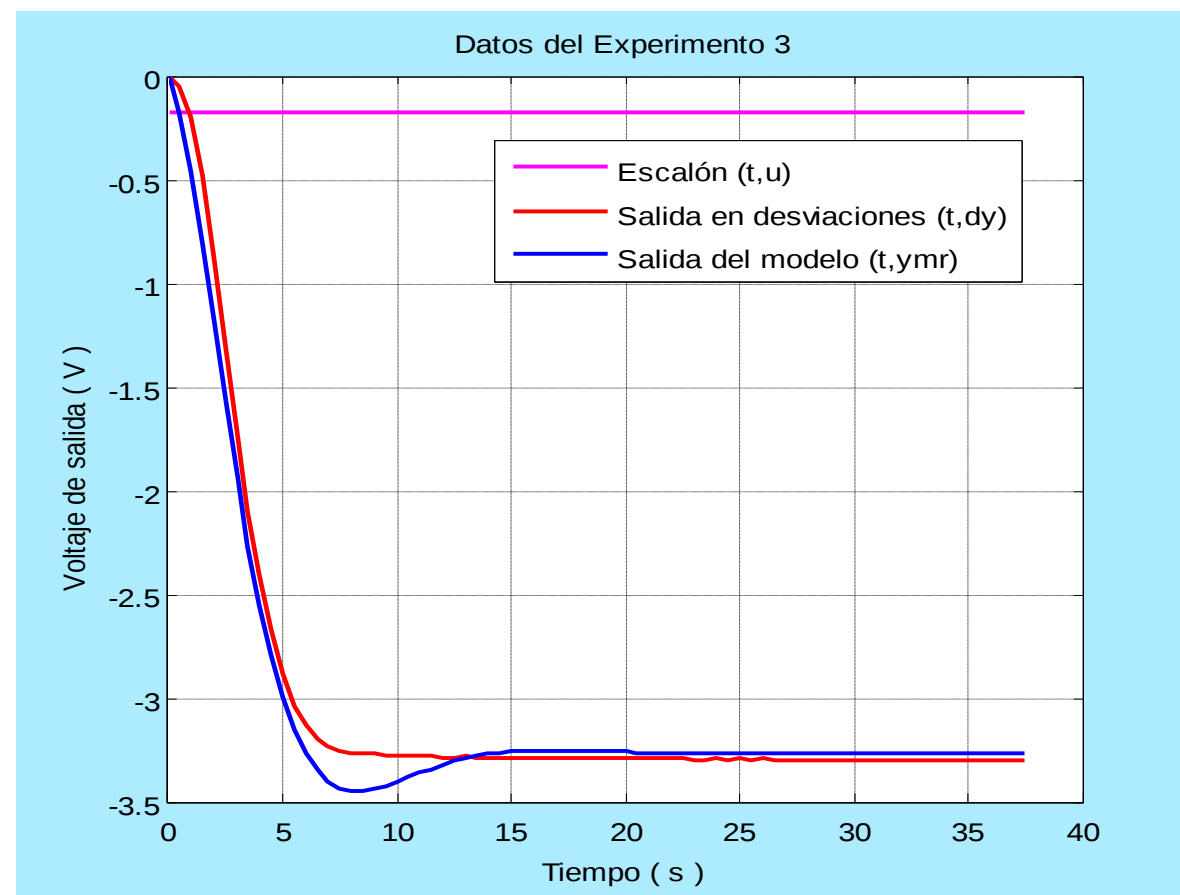
-----  
 $(z^2 - 1.661z + 0.7138)$

Sampling time: 0.5

### ESCALÓN DE SUBIDA

na=2; nb=1; nk=1;

| Desviación estándar | Error cuadrático medio | Máximo error absoluto |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 0.0969              | 0.0094                 | 0.3231                |



Anexo 51. Experimento 3: escalón de subida

| Escalón | Estructura | Orden |   | Parámetros |    |    | GANANCIA |
|---------|------------|-------|---|------------|----|----|----------|
| Subida  | ARX        | N     | D | na         | nb | nk |          |
| SEXP3   | ARX        | 2     | 3 | 3          | 1  | 1  |          |
| BEXP3   | ARX        |       |   | 3          | 1  | 1  |          |

$$Ganancia = \frac{27.47}{1.501} = 18,30113257828115 \approx 18.30$$

$$Ganancia = \frac{18.42}{1.008} = 18,27380952380952 \approx 18.27$$

ESCALÓN DE SUBIDA

na=3; nb=1; nk=1;

Este es el modelo ARX na=3; nb=1; nk=1

Discrete-time IDPOLY model:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$

$A(q) = 1 - 1.856 (+0.03583) q^{-1} + 1.321 (+0.05556) q^{-2} - 0.3544$   
 $(+0.02424) q^{-3}$

$B(q) = 2.01 (+0.07978) q^{-1}$

Estimated using ARX

Loss function 5.64131e-005 and FPE 6.23513e-005

Sampling interval: 1

Modelo continuo

Transfer function:

$1.825 s^2 + 12.59 s + 27.47$

$s^3 + 2.075 s^2 + 2.963 s + 1.501$

Zero/pole/gain:

$1.8254 (s^2 + 6.899s + 15.05)$

$(s+0.7654) (s^2 + 1.309s + 1.961)$

Modelo discreto

Transfer function:

$2.01 z^2 + 3.013e-015 z - 1.69e-015$

$z^3 - 1.856 z^2 + 1.321 z - 0.3544$

Sampling time: 0.5

Zero/pole/gain:

$2.0102 (z+2.899e-008) (z-2.899e-008)$

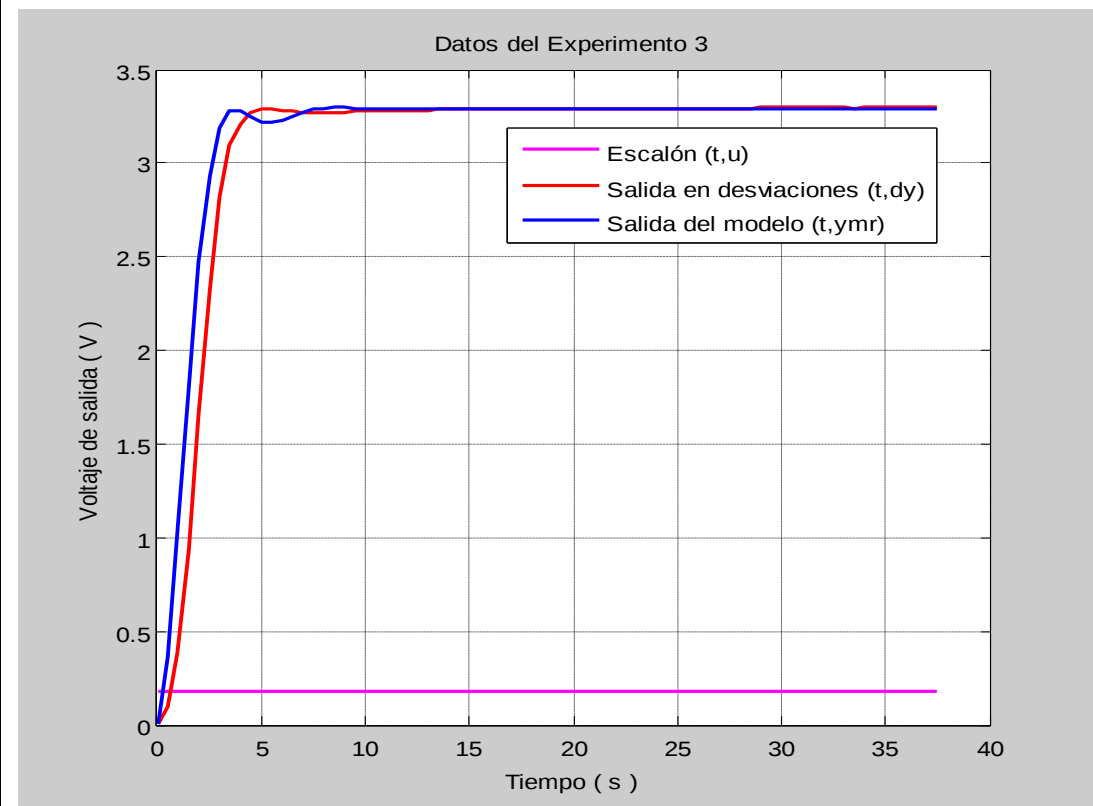
$(z-0.682) (z^2 - 1.174z + 0.5197)$

Sampling time: 0.5

ESCALÓN DE SUBIDA

na=3; nb=1; nk=1;

| Desviación estándar | Error cuadrático medio | Máximo error absoluto |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 0.1746              | 0.0305                 | 0.8698                |



## Anexo 52. Experimento 3: escalón de bajada

### ESCALÓN DE BAJADA

na=3; nb=1; nk=1;

Este es el modelo ARX na=3; nb=1; nk=1

Discrete-time IDPOLY model:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$

$$A(q) = 1 - 1.817 (+0.05588) q^{-1} + 1.069 (+0.0933) q^{-2} - 0.1943 (+0.0408) q^{-3}$$

$$B(q) = 1.067 (+0.05856) q^{-1}$$

Estimated using ARX

Loss function 2.8594e-005 and FPE 3.16039e-005

Sampling interval: 1

Modelo continuo

Transfer function:

$$1.031 s^2 + 7.99 s + 18.42$$

$$s^3 + 3.277 s^2 + 2.939 s + 1.008$$

Zero/pole/gain:

$$1.0312 (s^2 + 7.748s + 17.87)$$

$$(s+2.111) (s^2 + 1.166s + 0.4776)$$

Modelo discreto

Transfer function:

$$1.067 z^2 - 7.651e-016 z - 3.814e-017$$

$$z^3 - 1.817 z^2 + 1.069 z - 0.1943$$

Sampling time: 0.5

Zero/pole/gain:

$$1.0673 z^2$$

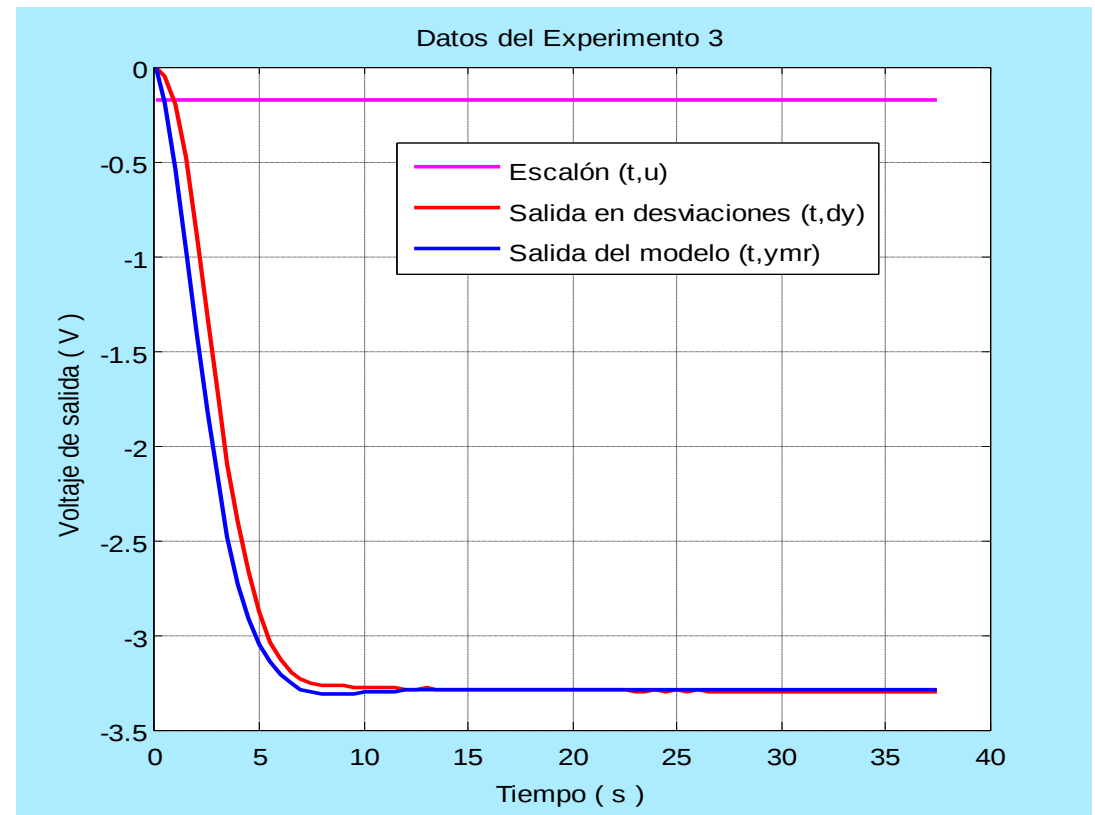
$$(z-0.348) (z^2 - 1.469z + 0.5582)$$

Sampling time: 0.5

### ESCALÓN DE BAJADA

na=3; nb=1; nk=1;

| Desviación estándar | Error cuadrático medio | Máximo error absoluto |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 0.1304              | 0.0170                 | 0.5259                |



Anexo 53. Experimento 3: escalón de subida

| Escalón | Estructura | Orden |   | Parámetros |    |    | GANANCIA |
|---------|------------|-------|---|------------|----|----|----------|
| Subida  | ARX        | N     | D | na         | nb | nk |          |
| SEXP3   | ARX        | 3     | 4 | 4          | 1  | 1  |          |
| BEXP3   | ARX        |       |   | 4          | 1  | 1  |          |

$$Ganancia = \frac{408}{22.32} = 18,27956989247312 \approx 18.29$$

$$Ganancia = \frac{18.42}{1.008} = 18,27380952380952 \approx 18.27$$

**ESCALÓN DE SUBIDA**

na=4; nb=1; nk=1;

Discrete-time IDPOLY model:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$

$A(q) = 1 - 1.558 (+0.07576) q^{-1} + 0.9492 (+0.1424) q^{-2} - 0.2305 (-0.106) q^{-3} + 0.004943 (+0.03088) q^{-4}$

$B(q) = 3.036 (+0.1604) q^{-1}$

Estimated using ARX

Loss function 2.16943e-005 and FPE 2.47498e-005

Sampling interval: 1

Modelo continuo

Transfer function:

$3.082 s^3 + 46.28 s^2 + 228.1 s + 408$

$s^4 + 10.62 s^3 + 28.42 s^2 + 40.22 s + 22.32$

Zero/pole/gain:

$3.0824 (s+7.496) (s^2 + 7.518s + 17.66)$

$(s+7.488) (s+1.082) (s^2 + 2.05s + 2.755)$

Transfer function:

$3.036 z^3 + 4.79e-015 z^2 - 5.985e-016 z - 4.81e-017$

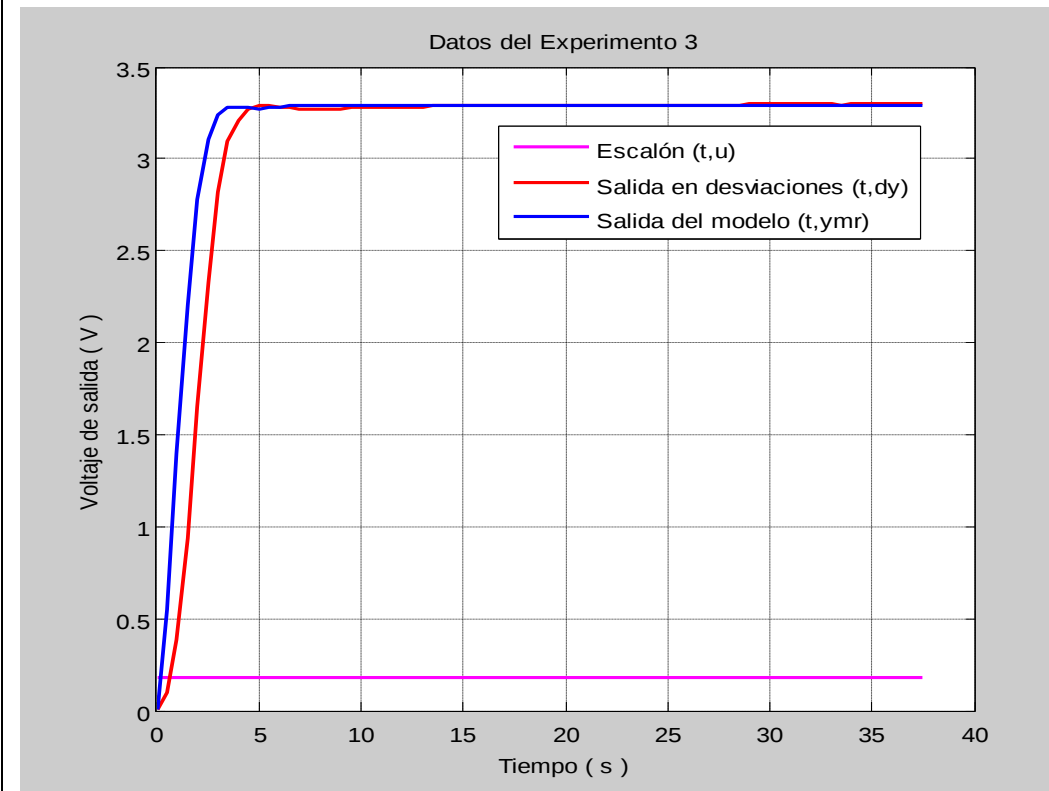
$z^4 - 1.558 z^3 + 0.9492 z^2 - 0.2305 z + 0.004943$

Sampling time: 0.5

**ESCALÓN DE SUBIDA**

na=4; nb=1; nk=1;

| Desviación estándar | Error cuadrático medio | Máximo error absoluto |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 0.2468              | 0.0609                 | 1.2720                |



Zero/pole/gain:

$3.0361 (z-2.512e-006) (z^2 + 2.512e-006z + 6.308e-012)$

$(z-0.5823) (z-0.02366) (z^2 - 0.9516z + 0.3588)$

Sampling time: 0.5

## Anexo 54. Experimento 3: escalón de bajada

### ESCALÓN DE BAJADA

**na=4; nb=1; nk=1;**

Este es el modelo ARX na=4; nb=1; nk=1

Discrete-time IDPOLY model:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$

$$A(q) = 1 - 1.322 (+0.09983) q^{-1} + 0.229 (+0.1874) q^{-2} + 0.2517 (+0.1321) q^{-3} - 0.06591 (+0.03902) q^{-4}$$

$$B(q) = 1.686 (+0.1168) q^{-1}$$

Estimated using ARX

Loss function 1.89049e-005 and FPE 2.13924e-005

Sampling interval: 1

Warning: There is a pole of the model at, or close to, the negative real-axis.

Transformation of such models using the "d2c" command may be unreliable.

> In idpoly.d2caux at 96

In idmodel.d2c at 109

In thd2thc at 51

In ldenOsbeida40 at 31

Modelo continuo

Transfer function:

$$2.167 s^3 + 16.6 s^2 + 44.46 s + 38.59$$

$$s^4 + 5.439 s^3 + 9.888 s^2 + 7.23 s + 2.111$$

Zero/pole/gain:

$$2.1667 (s+1.753) (s^2 + 5.91s + 10.16)$$

$$(s+2.528) (s+1.724) (s^2 + 1.186s + 0.4842)$$

Modelo discreto

Transfer function:

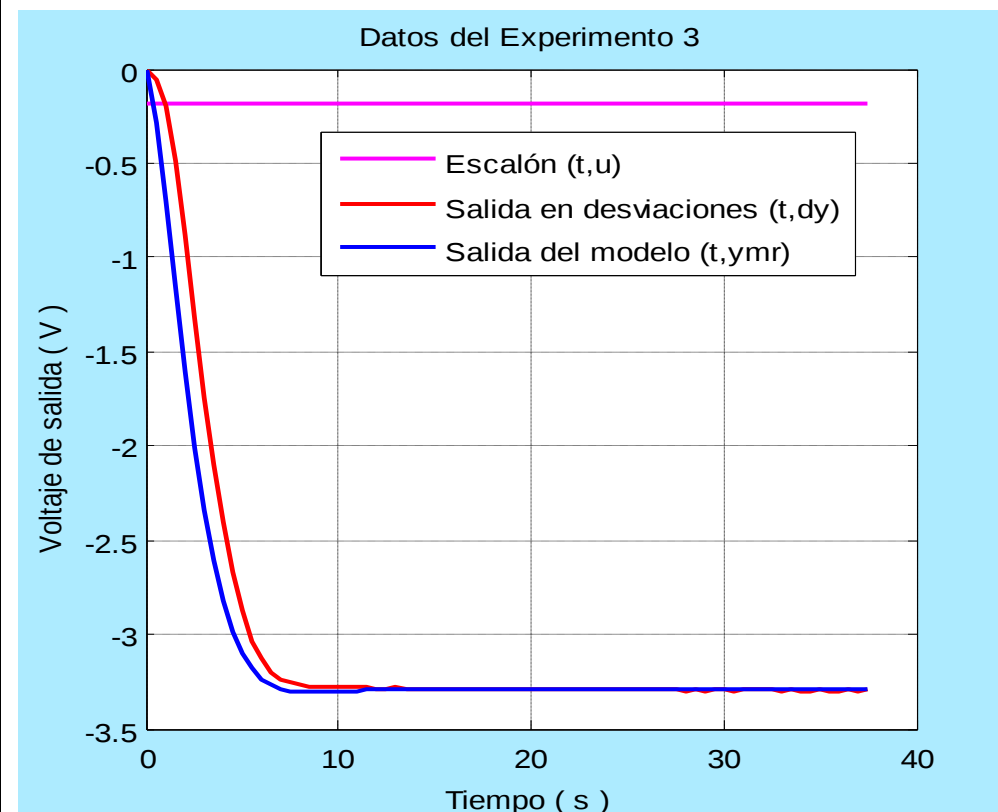
$$1.607 z^3 - 1.173 z^2 + 0.2802 z - 0.02933$$

$$z^4 - 2.167 z^3 + 1.702 z^2 - 0.5638 z + 0.06591$$

### ESCALÓN DE BAJADA

**na=4; nb=1; nk=1;**

| Desviación estándar | Error cuadrático medio | Máximo error absoluto |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 0.1778              | 0.0316                 | 0.7216                |



Sampling time: 0.5

Zero/pole/gain:

$$1.607 (z-0.4163) (z^2 - 0.3136z + 0.04384)$$

$$(z-0.4222) (z-0.2825) (z^2 - 1.462z + 0.5526)$$

Sampling time: 0.5

Anexo 55. Experimento 3: escalón de subida

| Escalón | Estructura | Orden |   | Parámetros |    |    | GANANCIA                                                                                                                                  |
|---------|------------|-------|---|------------|----|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Subida  | ARX        | N     | D | na         | nb | nk | $Ganancia = \frac{6.36}{0.3397} = 18,72240211951722 \approx 18.72$<br>$Ganancia = \frac{4.208}{0.2217} = 18,98060442038791 \approx 18.98$ |
| SEXP3   | ARX        | 1     | 1 | 1          | 1  | 1  |                                                                                                                                           |
| BEXP3   | ARX        | 1     | 1 | 1          | 1  | 1  |                                                                                                                                           |

**ESCALÓN DE SUBIDA**

na=1; nb=1; nk=1;

Discrete-time IDPOLY model:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$   
 $A(q) = 1 - 0.8438 (+/-0.01614) q^{-1}$

$B(q) = 2.925 (+/-0.2838) q^{-1}$

Estimated using ARX

Loss function 0.00897162 and FPE 0.00944381

Sampling interval: 1

Modelo continuo

Transfer function:

6.36

s + 0.3397

Zero/pole/gain:

6.3599

(s+0.3397)

Transfer function:

2.925

z - 0.8438

Sampling time: 0.5

Zero/pole/gain:

2.9246

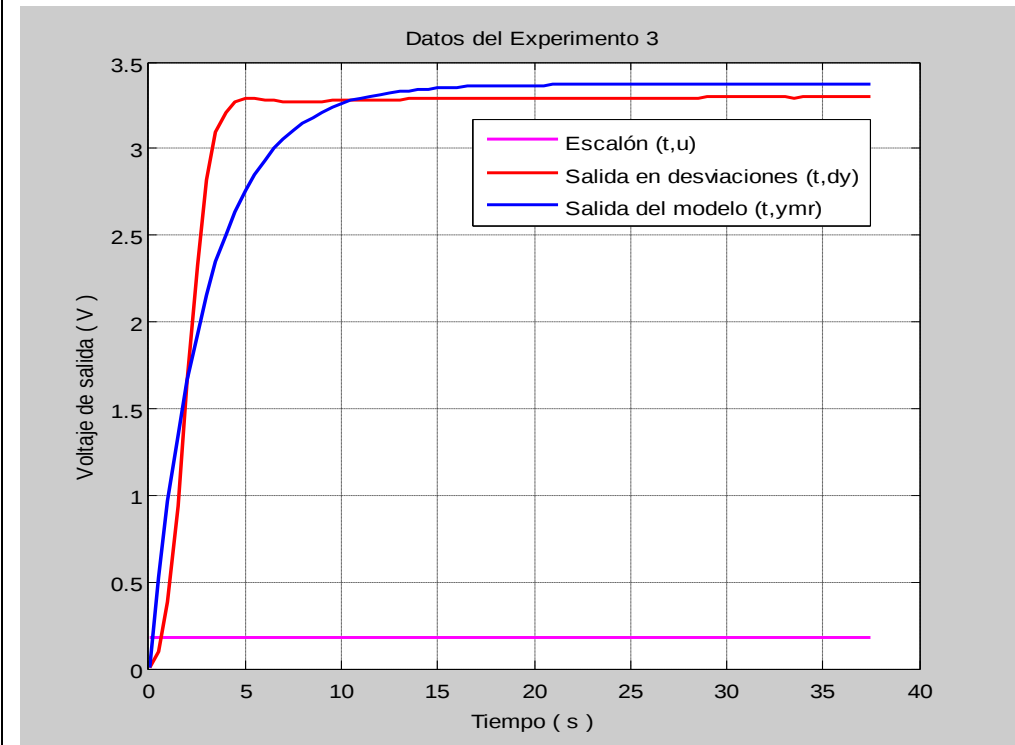
(z-0.8438)

Sampling time: 0.5

**ESCALÓN DE SUBIDA**

na=1; nb=1; nk=1;

| Desviación estándar | Error cuadrático medio | Máximo error absoluto |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 0.2255              | 0.0508                 | 0.7552                |



## Anexo 56. Experimento 3: escalón de bajada

### ESCALÓN DE BAJADA

na=1; nb=1; nk=1;

Este es el modelo ARX na=1; nb=1; nk=1

Discrete-time IDPOLY model:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$

$A(q) = 1 - 0.8951 (+0.009968) q^{-1}$

$B(q) = 1.992 (+0.1717) q^{-1}$

Estimated using ARX

Loss function 0.0045032 and FPE 0.00474021

Sampling interval: 1

Modelo continuo

Transfer function:

4.208

s + 0.2217

Zero/pole/gain:

4.2085

(s+0.2217)

Modelo discreto

Transfer function:

1.992

z - 0.8951

Sampling time: 0.5

Zero/pole/gain:

1.9918

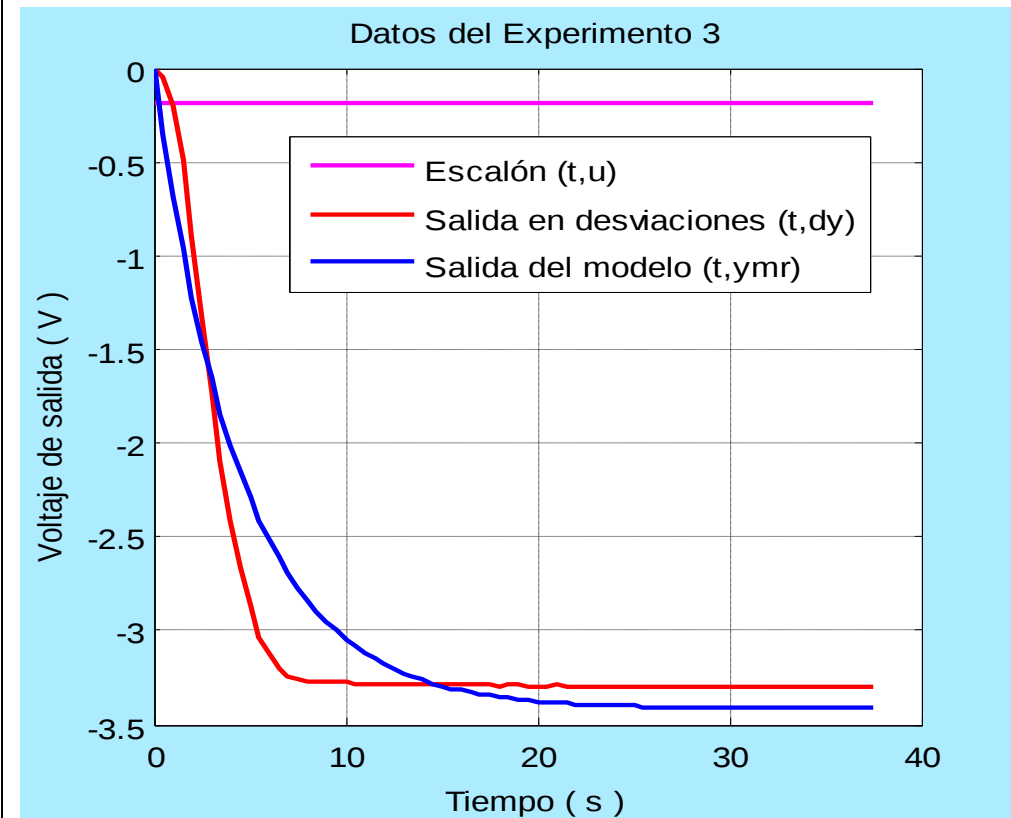
(z-0.8951)

Sampling time: 0.5

### ESCALÓN DE BAJADA

na=1; nb=1; nk=1;

| Desviación estándar | Error cuadrático medio | Máximo error absoluto |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 0.2390              | 0.0571                 | 0.6281                |



Anexo 57. Publicación 1: VI Conferencia Electromagnetismo Aplicado, CNEA 2015



*Ing. Osbeida López Almarales*

Anexo 58. Publicación 2: VI Conferencia Electromagnetismo Aplicado, CNEA 2015



**CNEA'2015**



**VI Conferencia de  
Electromagnetismo Aplicado**

5 - 8 de Mayo de 2015

# Certificado

A los autores:

**Fidel Gilart González, Osbeida López,  
Erick Osvaldo Rojas Falcón**

**Por su participación con la Ponencia:**

**Determinación de la inductancia de CD del  
electroimán de un espectrómetro de RMN,**

**Dado en Santiago de Cuba, el 8 de mayo de 2015**

**"Año 57 de la Revolución"**

MSc. Melek Campos Sofia  
Presidente del Comité Organizador



11 de Mayo de 2015  
"Año 57 de la Revolución"

**VALORACIÓN DE LA OFICINA TERRITORIAL DE NORMALIZACIÓN DE SANTIAGO DE CUBA  
LABORATORIO DE MEDICIONES MAGNETICAS**

**Tema de Maestría:** Caracterización Estática y Dinámica de un Electroimán.

**Autor:** Ing. Osbeida López Almarales.

- **Actualidad e Importancia.**

El tema investigado tiene gran actualidad científica y práctica, pues tiene correspondencia con una de las líneas investigativas priorizadas del país dentro del campo de la metrología, que es establecer un sistema de mediciones magnéticas que garantice la trazabilidad de la magnitud de campos magnéticos y otras derivadas de estas al SI. El módulo principal de este sistema es un Electroimán capaz de generar un campo magnético aproximadamente de 2 T, con una fuente de corriente de estabilidad  $10^{-6}$ ; comercializados por la firma alemana Bruker, para el cual se prevé, dentro de sus funciones, utilizarlo en experimentos de espectroscopía, donde se necesitan campos magnéticos superiores a  $10^{-9}$  y actualmente no se realizan en el país por no existir sistemas magnéticos capaces de alcanzar la estabilidad requerida.

El desarrollo de esta investigación proporciona las características estáticas con los mejores puntos de operación y el comportamiento dinámico del Electroimán. El modelo servirá para posteriores diseños y estrategias de control, aumentando la eficiencia del proceso y acercando la tecnología a las usadas actualmente a nivel mundial; y con el uso de la simulación se pueden hacer predicciones sin necesidad de recurrir al proceso real, sin poner en riesgo el equipo. Una estrategia de control que permita aumentar las prestaciones del equipo, donde puedan realizarse ensayos de espectroscopía, resuelve la problemática que presenta el país de no realizar estos ensayos por no poseer tecnologías capaces de alcanzar la estabilidad requerida en su funcionamiento, además, estas tecnologías solo son privativas de países desarrollados y de difícil adquisición por países en vías de desarrollo, como el nuestro.

---

- **Evaluación y Conclusiones**

1. La principal significación que se tendría si se lograra un modelo matemático, es diseñar estrategias de control en trabajos posteriores para el Electroimán, con el objetivo de realizar los ensayos y análisis por el método de la espectroscopía que tanto se necesitan en el país, para de esta forma fortalecer nuestra economía nacional, elevando la calidad y competitividad de los productos y servicios que se exportan.
2. 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.
3. Los resultados de las investigaciones derivadas en virtud de la tecnología empleada en el sistema de mediciones magnéticas, actúan de manera directa en la calidad de vida de los seres humanos.
4. Aumenta el conocimiento cuantitativo de los sistemas generadores de campos magnéticos vinculados a la industria médica, donde en la eficacia de una terapia, puede no solo, influir la intensidad del campo magnético aplicado, sino también la homogeneidad, gradientes y otros parámetros importantes de los campos magnéticos.

La OTNSCU reconoce el trabajo desarrollado y el esfuerzo empleado por el colectivo de trabajo (maestrante, tutores y entidades) para darle solución a las problemáticas que se presentan, producto de mejorar la tecnología perteneciente al laboratorio de Mediciones Magnéticas de nuestro país: y considera que el trabajo desarrollado por la Ing. Osbeida López Almarales, cumple el objetivo fundamental de la investigación, dando cumplimiento a lo considerado como la segunda parte del establecimiento del futuro Patrón Nacional de Magnetismo de nuestro país.

**Centros que trabajaron en el proyecto:**

- Oficina Territorial de Normalización de Santiago de Cuba (OTNSCU).
- Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA).
- Departamento de Control Automático, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente.

---

MSc. Erick Osvaldo Rojas Falcón

J. Lab. Mediciones Magnéticas

OTN Santiago de Cuba