

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Implementación de un Control Adaptativo de Ganancia Programada, para efectuar el control de la frecuencia de salida de un generador, ante variaciones en la referencia.

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

MAGISTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

Presentado Por:

Ing. Angelo Roberto Parra Alvarado

Guayaquil – Ecuador

2011

Agradecimientos

A Jehová Dios, por darme la fuerza voluntad y deseos para culminar esta etapa de mi carrera profesional.

A mis Padres, mi esposa Beatriz y mi hijo Isaac, por su paciencia y apoyo brindado en todo momento, para alcanzar las metas propuestas.

A la compañía Importadora Industrial Agrícola S.A. por el apoyo moral y económico dado.

A todos los Profesores de la Maestría, por el esfuerzo desplegado para pulirnos y mejorar nuestro nivel académico.

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral, por forjarme no solo como técnico sino como un hombre de bien para la sociedad ecuatoriana.

A todos muchas gracias.

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado a mi familia, los cuales siempre han sido mi pilar de apoyo, mi inspiración y principal motivación para superarme.

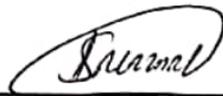
A todas las personas que me han apoyado en toda esta aventura que es la vida, con sus consejos, palabras de aliento y reprimendas, las que han contribuido a mi formación.

Tribunal de Sustentación



Msc. Jorge Aragundi

SUBDECANO - FIEC



Msc. Carlos Salazar

DIRECTOR DE TESIS



Msc. Efrén Herrera

MIEMBRO PRINCIPAL

Declaración Expresa

“La responsabilidad del contenido de ésta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Angelo Parra Alvarado', is written over a solid horizontal line.

Ing. Angelo Parra Alvarado

INDICE GENERAL

RESUMEN	V
INDICE DE FIGURAS	VIII
INDICE DE TABLAS	X
INTRODUCCION	Pag. 01
OBJETIVO GENERAL	Pag. 02
OBJETIVOS ESPECIFICOS	Pag. 02
METODOLOGIA	Pag. 03
1.- SITUACION ACTUAL.	Pag. 05
2.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	Pag. 10
2.1.- FUNDAMENTOS TEORICOS DE IDENTIFICACION DE SISTEMA.	
2.1.1.- Introducción a Identificación de Sistemas.	Pag. 10
2.1.2.- Tipos de Modelos.	Pag. 12
2.1.3.- Métodos de obtención de modelos.	Pag. 14
2.1.4.- Consideraciones Prácticas sobre Identificación.	Pag. 16
2.1.4.1.- Obtención de datos.	Pag. 16
2.1.4.2.- Elección de la señal a medir.	Pag. 17
2.1.4.3.- Elección del Tipo de entrada.	Pag. 17

2.1.4.4.- Elección del Periodo de muestreo.	Pag. 19
2.1.4.5.- Elección del número de muestras a tomar.	Pag. 19
2.1.5.- Pre- Tratamiento de datos.	Pag. 20
2.1.5.1.- Elección de perturbación de alta frecuencia.	Pag. 21
2.1.5.2.- Eliminación de datos erróneos.	Pag. 21
2.1.5.3.- Tratamiento de niveles de continua.	Pag. 21
2.1.6.- Validación del Modelo.	Pag. 23
2.2.- FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE CONTROL EN TIEMPO CONTINUO.	
2.2.1.- Introducción a Sistemas de Control Continuos.	Pag. 26
2.2.2.- Respuesta en el tiempo de Sistemas Continuos.	Pag. 27
2.2.3.- Sintonización de Controladores PID en tiempo Continuo.	Pag. 28
2.3.- FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE CONTROL EN TIEMPO DISCRETO.	
2.3.1.- Introducción a los Sistemas Control en tiempo Discreto.	Pag. 30
2.3.2.- El Muestreador.	Pag. 31
2.4.- FUNDAMENTOS DE CONTROL ADAPTATIVO.	
2.4.1.- Introducción al Método de Control Adaptativo –MPC.	Pag. 34
2.4.2.- Estrategia del MPC.	Pag. 37

2.4.3.- Control Adaptativo de Ganancia Programada.	Pag. 41
2.5.- FUNDAMENTOS DE SISTEMAS SCADAS.	
2.5.1.- Introducción.	Pag. 45
2.5.2.- Hardware y Software.	Pag. 46
3.- DISEÑO DE LA SOLUCION.	Pag. 48
3.1.- DISEÑO DE LA PLANTA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA	Pag. 50
3.2.- DISEÑO DE PANTALLAS DE CONTROL.	Pag. 52
3.3.- DISEÑO DE LA PRUEBA.	Pag. 52
4.- IMPLEMENTACION	
4.1.- Construcción de la Planta de Generación de Energía.	Pag. 54
4.1.1.- Selección del Primo Motor para la Planta.	Pag. 55
4.1.2.- Selección del Variador de Frecuencia.	Pag. 56
4.1.3.- Selección del Módulo de Adquisición de Datos.	Pag. 58
4.1.4.- Selección del Medidor de Energía.	Pag. 59
4.1.5.- Selección del Convertidor de Señal de Comunicación.	Pag. 60
4.2.- Implementación de Pantallas de Control.	Pag. 65

5.- RESULTADO DE PRUEBAS

Pag. 73

CONCLUSIONES.

RECOMENDACIONES.

ANEXOS.

Anexo No. 01. Datos técnicos del motor eléctrico.

Anexo No. 02. Datos técnicos del variador de frecuencia.

Anexo No. 03. Datos técnicos de tarjeta de adquisición de datos.

Anexo No. 04. Datos técnicos del Medidor de Energía. 04)

Anexo No. 05. Datos técnicos del Convertidor de Protocolo.

Anexo No. 06.- LABORATORIOS.

Laboratorio No. 01.- Identificación de Sistemas por el Método No
Paramétrico.

Laboratorio No. 02.- Identificación de Sistemas por el Método Paramétrico.

Laboratorio No. 03.- Diseño de Control para la Planta Identificada.

Laboratorio No. 04.- Programación del Control Adaptativo de Ganancia
Programada.

BIBLIOGRAFIA

RESUMEN

Uno de los parámetros más importantes de un grupo electrógeno, es la frecuencia de salida de generador, la cual sino se mantiene estable e igual a la referencia seleccionada, causará que la carga eléctrica conectada a este generador tengan un mal desempeño.

En ésta tesis se implementará un Control Adaptativo de Ganancia Programada, para efectuar el control de la frecuencia de salida, de un generador de energía eléctrica, la cual debe recuperarse rápidamente y mantenerse en el valor fijado en la referencia.

Es difícil tener disponible un grupo electrógeno o planta de generación de energía eléctrica, para la aplicación de la técnica de control propuesta, debido a los riesgos implícitos y los costos en los que se incurrirían, razón por la cual se procederá a construir una Planta de Generación de Energía Eléctrica para la implementación de éste control. Adicionalmente se desarrollarán a través del software Labview 8.6, las pantallas del sistema de control y adquisición de datos requeridos.

En el capítulo 1 se explica sobre los diversos tipos de control de la frecuencia de salida, empleados en los grupos electrógenos que son propulsados por motores diesel. También se explica cómo han ido variando, de acuerdo a las regulaciones de control de emisiones de la Agencia de Protección del Medioambiente.

En el capítulo 2 se explican, los fundamentos teóricos requeridos para la interpretación de los resultados, que se obtendrán en las diversas pantallas de control que se implementarán. En la primera parte del capítulo se revisaran los fundamentos de identificación de sistemas, a continuación los fundamentos de Sistemas Continuos, luego los fundamentos de Sistema de Control en Tiempo Discreto, después los fundamentos de Control Adaptativo y finalmente los fundamentos de Sistemas Scada.

En el capítulo 3 se explica el diseño de la solución, en la primera parte se efectúa un diseño preliminar de los elementos principales que forman la planta de Generación de Energía, en la segunda parte se dan los lineamientos generales para el desarrollo de las pantallas de control requeridas. En la tercera parte se explica cómo se obtendrán las funciones de transferencia para los diversos puntos de operación seleccionados.

En la primera parte del capítulo 4, se detalla el proceso de construcción de la Planta de Generación de Energía y los parámetros que se tomaron en consideración, para la selección de los diversos elementos que integran la Planta, en la segunda parte se muestran las diversas pantallas de Control y Monitoreo de la Planta, para la Implementación del Control Adaptativo.

En el capítulo 5 se efectúan las pruebas, las cuales consisten en efectuar la Identificación Paramétrica para encontrar las funciones de transferencia que

representa a la Planta de Generación de Energía en los diversos puntos de operación, una vez encontradas las funciones de transferencia, se las sintoniza usando la interfaz grafica desarrollada para encontrar los valores de K_p , K_i y k_d correspondientes, que serán ingresados en otra de las pantallas de la interfaz grafica, para habilitar el Control Adaptativo de Ganancia Programada.

En la penúltima sección se exponen las Conclusiones y Recomendaciones respectivamente.

En la última sección están los respectivos Anexos con las especificaciones técnicas de los equipos empleados y la Bibliografía.

INDICE DE FIGURAS

Figura 01. Gobernador Mecánico de Velocidad.	Pag. 05
Figura 02. Gobernador, actuador y captador magnético.	Pag. 06
Figura 03. Gobernador Electrónico.	Pag. 07
Figura 04. Potencia vs. Velocidad en motores de combustión interna.	Pag. 08
Figura 05. Caída de Frecuencia vs. Tiempo.	Pag. 09
Figura 06. Representación de un sistema.	Pag. 11
Figura 07. Entrada binaria aleatoria para sistemas lineales.	Pag. 18
Figura 08. Entrada escalonada aleatoria para sistemas no lineales.	Pag. 18
Figura 09. Salida $y(t)$ ante entrada $U(t)$.	Pag. 26
Figura 10. Muestreador.	Pag. 31
Figura 11. Período de muestreo T .	Pag. 32
Figura 12. Producto tren de pulsos por la señal original.	Pag. 32
Figura 13. Tren de impulsos.	Pag. 33
Figura 14. Estrategia de los controladores MPC.	Pag. 37
Figura 15. Modelo para predecir el estado de la salida.	Pag. 41
Figura 16. Sistema de Control en Lazo Abierto.	Pag. 48
Figura 17. Sistema de Control en Lazo Cerrado.	Pag. 49
Figura 18. Diagrama de bloques de la Planta a construirse.	Pag. 51
Figura 19. Motor Eléctrico.	Pag. 56
Figura 20. Variador de Frecuencia.	Pag. 58
Figura 21. Modulo de Adquisición de Datos DAQ 6008.	Pag. 59

Figura 22. Medidor de Energía Power Measurement 3710.	Pag. 59
Figura 23. Convertidor de Protocolo de RS485 a RS232.	Pag. 60
Figura 24. Grupo Motor-alternador.	Pag. 61
Figura 25. Estructura Metálica.	Pag. 61
Figura 26. Base Metálica de estructura.	Pag. 62
Figura 27. Montaje de Tarjetas.	Pag. 62
Figura 28. Proceso de cableado y prueba de equipos.	Pag. 63
Figura 29. Planta terminada.	Pag. 64
Figura 30. Pantalla de Control Principal.	Pag. 65
Figura 31. Pantalla de Parámetros del Alternador.	Pag. 66
Figura 32. Pantalla de Sistema en Lazo Abierto.	Pag. 67
Figura 33. Pantalla de Identificación No Paramétrica.	Pag. 68
Figura 34. Pantalla de Identificación Paramétrica.	Pag. 69
Figura 35. Pantalla de Diseño de Control en tiempo Continuo.	Pag. 70
Figura 36. Pantalla de Diseño de Control en tiempo Discreto.	Pag. 71
Figura 37. Pantalla de Control Adaptativo de Ganancia Programada en Lazo Cerrado.	Pag. 72
Figura 38. Pantalla de Diseño de Control en tiempo Continuo.	Pag. 76
Figura 39. Pantalla de Control Adaptativo de Ganancia Programada en Lazo Cerrado.	Pag. 78
Figura 40. Interruptor de activación de Control Adaptativo de Ganancia Programada.	Pag. 79

Figura 41. Ingreso de referencia de Control Adaptativo de Ganancia Programada.	Pag. 80
Figura 42. Pantalla de Control Adaptativo de Ganancia Programada Ajustado.	Pag. 82

INDICE DE TABLAS

Tabla 01.	Pag. 77
Tabla 02.	Pag. 77
Tabla 03.	Pag. 81
Tabla 04.	Anexo 6
Tabla 05.	Anexo 6
Tabla 06.	Anexo 6

INTRODUCCIÓN.

La disponibilidad de energía eléctrica se ha convertido en uno de los recursos más importantes que impulsan el desarrollo de una nación, hoy en día todas las ciudades, fábricas, oficinas, campos agrícolas, de producción de gas o petróleo ubicados, desde el Ártico hasta el Ecuador, desde la cima de las montañas hasta las costas, requieren del suministro continuo de energía, pero debido a las condiciones geográficas, fiabilidad del sistema, costos implícitos para el tendido de líneas de transmisión o por los requerimientos de la aplicación, éstos deben tener su propias plantas de energía eléctrica, como fuente de energía principal o de respaldo.

Uno de los parámetros más importantes de las plantas de generación de energía eléctrica, es la frecuencia de salida de generador, la cuál sino se mantiene estable e igual a la referencia seleccionada, causará que la carga eléctrica conectada a este generador tenga un mal desempeño, reduciéndose el rendimiento del sistema, provocando lucros cesante por la falsa activación de protecciones e incrementando innecesariamente los costos de producción de la industria.

En ésta tesis se implementara un Control Adaptativo de Ganancia Programada, para efectuar el control de la frecuencia de salida, de un generador de energía eléctrica, la cual debe mantenerse en el valor fijado en la referencia.

La estrategia para la implementación del Control planteado, nos servirá para muchos otros procesos tales como, motores estacionarios empleados para sistemas de bombeo de petróleo, bombeo de agua potable, propulsión de barcos, control de velocidad de vehículos, etc.

Objetivo general:

Implementar un Control Adaptativo de Ganancia Programada, para efectuar el control de la frecuencia de salida, de una Planta de Generación de Energía Eléctrica, la cual debe mantenerse en el valor fijado en la referencia.

Objetivos específicos:

- Implementar un Control Adaptativo de Ganancia Programada, de una Planta de Generación de Energía Eléctrica.
- Sintonizar el control PID para diversos puntos de operación de la Planta de Generación de Energía, para mejorar su desempeño en lazo cerrado.
- Efectuar la Identificación en lazo abierto de la Planta de Generación de Energía, usando las técnicas de Identificación Paramétrica y No Paramétrica con el Software Labview.
- Construir, controlar y Monitorear una Planta de Generación de Energía Eléctrica, empleando los programas OPC Server y Labview.

Metodología.

Esta investigación es bibliográfica y de campo.

- **Bibliográfica.-** Debido a que la investigación se fundamentará en información escrita acerca del tema y problema planteado.
- **De Campo.-** Debido a que se obtendrán los datos a través de diversas interfases para enlazarse con la Planta de Generación de energía.

Por el Nivel de Conocimiento es:

- **Descriptiva.-** Debido a que describe y delimita los elementos del problema y su interrelación.
- **Explicativa.-** Debido a que argumenta acerca del proceso de adquisición de datos, y las técnicas de Identificación empleadas para posteriormente, determinar los ajustes para el control del sistema en lazo cerrado.

Por la participación de los sujetos es:

- **Cuantitativa.-** Ya que se tomará información numérica para apoyar la investigación.

Por el Periodo de Tiempo es:

- **Prospectiva.-** porque establece conclusiones y luego lo compara con la situación actual.

Instrumentos de recolección de Datos

Se utilizará como instrumentos de recolección de datos, equipos con capacidad de comunicación en red más una tarjeta especializada para adquisición de datos.

- **Inductivo.-** Debido a que se realizarán observaciones específicas del problema que nos permitirá luego establecer conclusiones generales.
- **Analítico.-** Porque relaciona hechos aparentemente aislados, y se formula una teoría que unifica los diversos elementos.
- **Sintético.-** Debido a que analizará un problema real, lo que permite una comprensión del hecho ó fenómeno.

1.- SITUACION ACTUAL.

La primera generación de los Motores de combustión interna, usados para propulsar los grupos electrógenos, tradicionalmente empleaban gobernadores de velocidad netamente mecánicos. Dichos gobernadores usan resortes y contrapesas que debido a la acción de la fuerza centrífuga, se accionan para mover el varillaje de entrega de combustible y por ende controlar la velocidad y frecuencia de salida del sistema (Ver Figura 01).

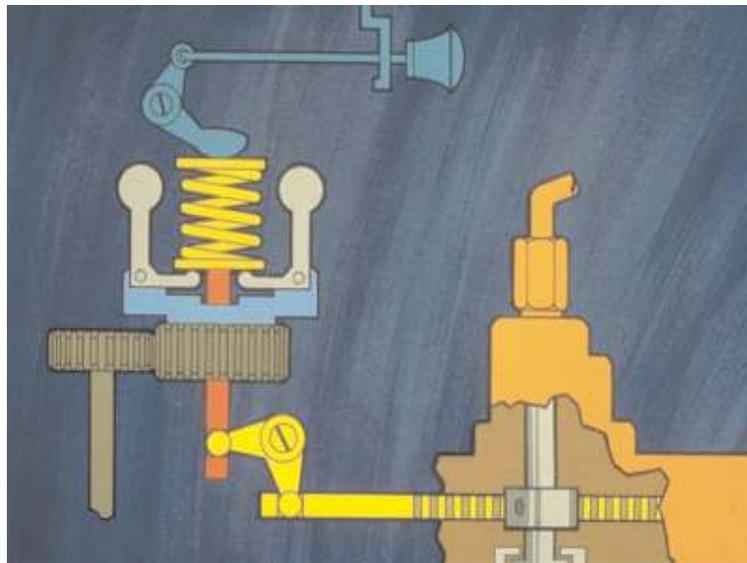


Figura 01. Gobernador mecánico de velocidad.

Avances tecnológicos en la electrónica trajeron la segunda generación de motores que accionaban a los grupos electrógenos, los cuales tienen gobernadores de velocidad electrónicos, con un actuador que mueve el varillaje de entrega de combustible y una tarjeta electrónica con un control proporcional integral y derivativo – PID (Ver Figura 02).



Figura 02. Gobernador, actuador y captador magnético para control de velocidad.

Posteriormente con la entrada en vigencia de las regulaciones de control de emisiones que se implementaron en Europa y Los Estados Unidos, los fabricantes de motores de esos países mejoraron sus diseños. Dichos cambios han sido aplicados en forma progresiva, razón por la cual el número de componentes mecánicos han disminuido, pero se incrementaron los componentes electrónicos que se encuentran en dichos motores (Ver Figura 03), esto dio origen a los motores de combustión interna de tercera y cuarta generación que ya incluían un

computador montado sobre el motor, pero que igualmente solo disponían de un control de velocidad tipo Proporcional Integral y Derivativo - PID.

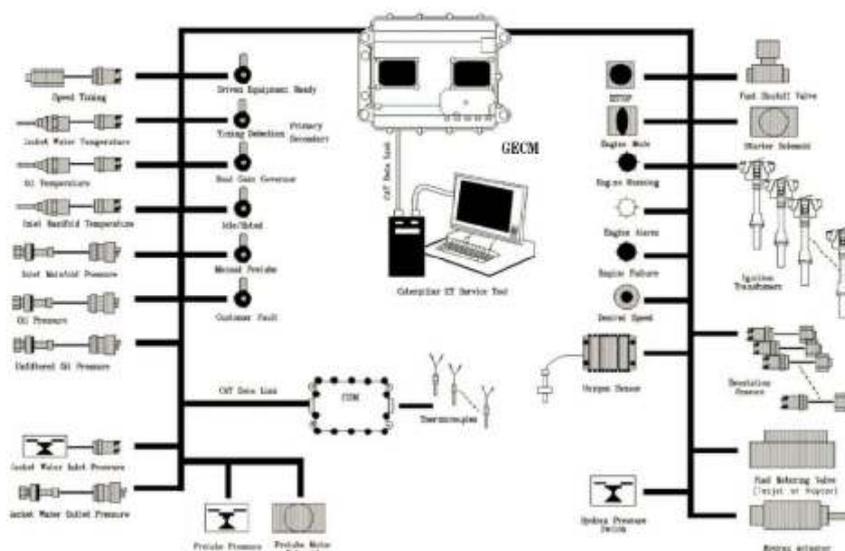


Figura 03. Gobernador electrónico.

Las últimas regulaciones de emisiones que entraron en vigencia en los Estados Unidos y Europa en el 2005, dieron origen a los motores de combustión interna de quinta generación, con controles electrónicos más avanzados, los cuales efectúan el control de velocidad del equipo mediante “mapas” que han sido desarrollados por los fabricantes de estos motores, por tanto dichos mapas solo pueden ser visto y modificados por los ingenieros de los fabricantes de dichos motores.

La curva característica de potencia desarrollada por un motor de combustión interna versus la velocidad la podemos ver en la Figura 04, En dicha curva se observa que la potencia desarrollada por los motores de combustión interna,

depende de las revoluciones del equipo, también se observa que dicha relación es no Lineal. Por tanto tener un solo control PID hace que la respuesta de los controles de velocidad y por tanto la frecuencia de salida de un grupo electrógeno, tenga un tiempo de recuperación un poco lento, que hace que el desempeño del sistema no sea el más idóneo, ante grandes variaciones de carga.

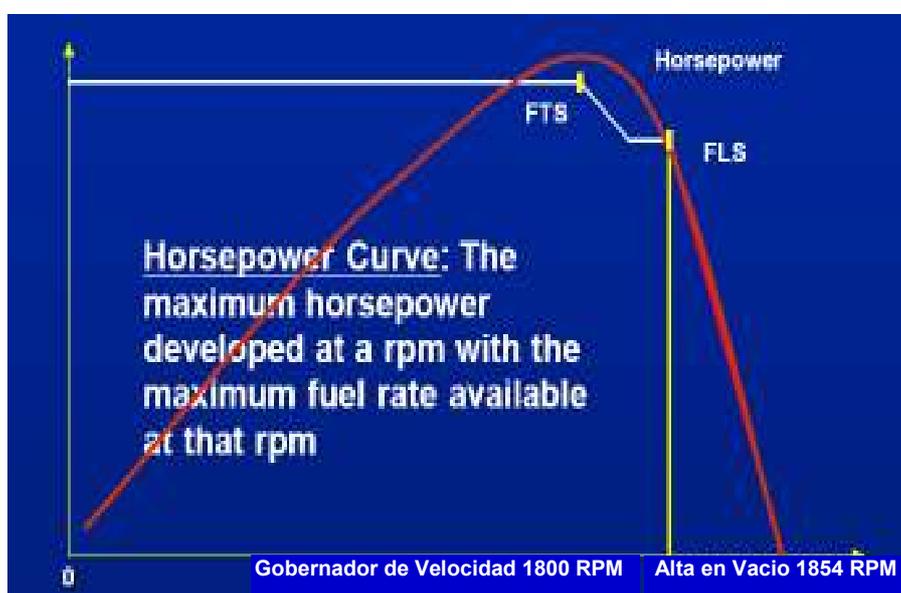


Figura 04. Potencia Vs. Velocidad de Motores de Combustión Interna.

Otro aspecto que debe ser considerado, es que las cargas eléctricas conectadas a los grupos electrógenos, tiene características muy dinámica y dependiendo de la magnitud de la carga aplicada ò que sea retirada, pueden causar grandes variaciones de velocidad, con largos periodos de recuperación de la frecuencia de salida del grupo electrógeno (Ver Figura 05). Estas grandes variaciones no son aceptables en aplicaciones donde se requiere una gran calidad de energía.

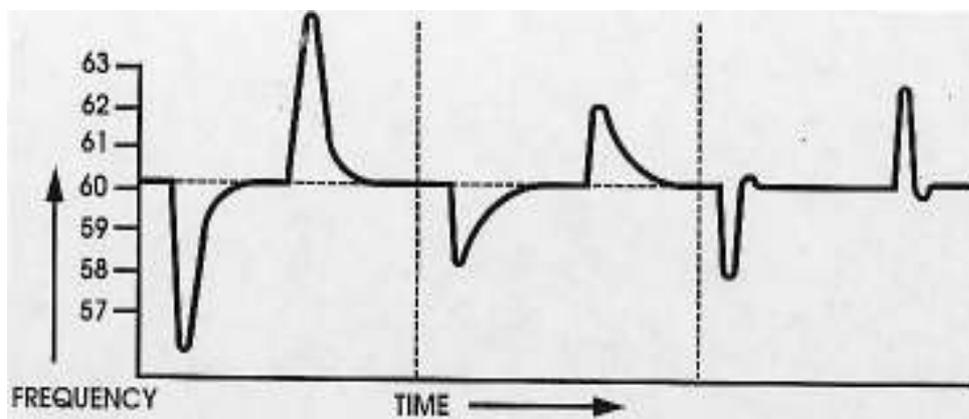


Figura 05. Caídas de Frecuencia vs. Tiempo.

Teniendo en mente la situación actual, el proyecto de ingeniería que desarrollaremos en ésta tesis, se centrará en encontrar una solución para mejorar el control de la velocidad y/o frecuencia de salida de los grupos electrógenos, que son accionados por motores de combustión interna de la primera a la cuarta generación, puesto que representa más del noventa por ciento de los motores instalados en el país y que aun están operativos.

2.- FUNDAMENTOS TEORICOS.

2.1.- FUNDAMENTOS TEORICOS DE IDENTIFICACION DE SISTEMAS.

2.1.1.- Introducción a Identificación de Sistemas.

La Identificación de Sistema es el método a utilizarse en Sistema Complejos, en los cuales la estructura interna del mismo se pierde, es decir los parámetros internos no tienen significado físico, las variables del sistema sean difíciles de modelar analíticamente ó las variables sean difíciles de medir. El modelo obtenido tendrá una validez limitada dentro de la gama de datos obtenidos experimentalmente.

La Identificación de Sistemas se enfoca en la modelización de sistemas dinámicos, a partir de datos experimentales. Para hacer esto básicamente se ajustarán los parámetros de un modelo dado, hasta que su salida coincida lo mejor que sea posible con la salida medida.

Para saber si un modelo es bueno, la mejor prueba es observar la salida del modelo, comparada con un grupo de datos que no haya sido usado para modelación Inicial.

El Sistema a Identificar seleccionado, es la **modelación de una planta de generación de energía**. Como sabemos existen muchos parámetros que entran en juego durante la operación de estos equipos, sin embargo nosotros centraremos nuestra estudio en los más importantes, como entrada tendremos la frecuencia de referencia del motor eléctrico y como parámetro de salida, tendremos la frecuencia de salida del generador.

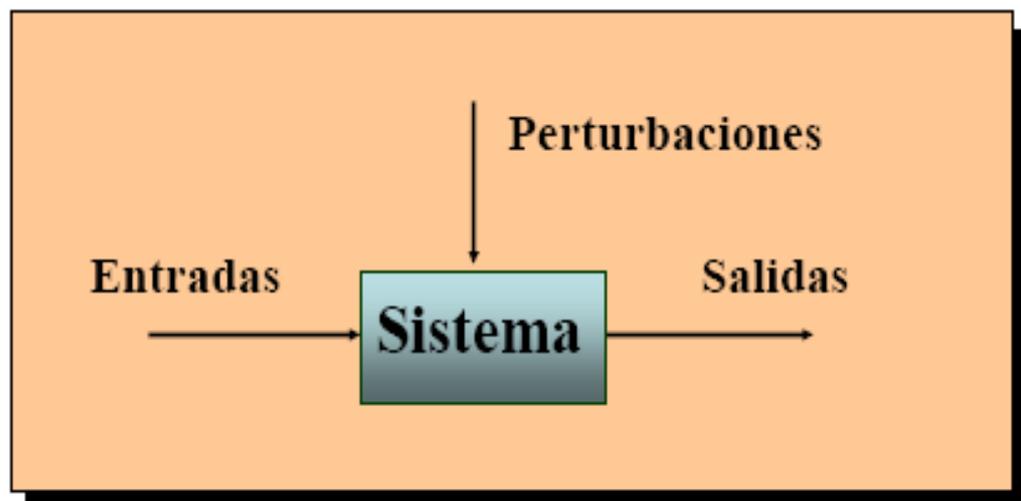


Figura 06. Representación de un sistema

La Figura 06 nos muestra la forma en que se debe representar un sistema, para efectuar la respectiva Identificación.

2.1.2.- Tipos de Modelos.

Los modelos de sistemas físicos pueden ser de muy diversos tipos. Una clasificación, en función del grado de formalismo matemático que poseen, es la siguiente:

- a. **Modelos mentales, intuitivos o verbales.** Estos modelos carecen de formalismo matemático. Para conducir un coche, por ejemplo, se requiere un modelo mental o intuitivo sobre el efecto que produce el movimiento del volante, pero no es necesario caracterizar dicho efecto mediante ecuaciones matemáticas exactas.

- b. **Modelos no paramétricos.** Muchos sistemas quedan perfectamente caracterizados mediante un gráfico o tabla que describa sus propiedades dinámicas mediante un número no finito de parámetros. Por ejemplo, un sistema lineal queda definido mediante su respuesta al impulso o al escalón, o bien mediante su respuesta en frecuencia.

- c. **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, como pueden ser ecuaciones diferenciales (para sistemas continuos) o en diferencias (para

sistemas discretos). En función del tipo de sistema y de la representación matemática utilizada, los sistemas pueden clasificarse en:

Determinísticos o estocásticos. Se dice que un modelo es determinístico, cuando expresa la relación entre entradas y salidas mediante una ecuación exacta. Por contra, un modelo es estocástico si posee un cierto grado de incertidumbre. Estos últimos se definen mediante conceptos probabilísticos o estadísticos.

Dinámicos o estáticos. Un sistema es estático, cuando la salida depende únicamente de la entrada en ese mismo instante (un resistor, por ejemplo, es un sistema estático). En éstos sistemas existe una relación directa entre entrada y salida, independiente del tiempo. Un sistema dinámico es aquél en el que las salidas evolucionan con el tiempo tras la aplicación de una determinada entrada, (por ejemplo, una red RC). En éstos últimos, para conocer el valor actual de la salida es necesario, conocer el tiempo transcurrido desde la aplicación de la entrada.

Continuos o discretos. Los sistemas continuos trabajan con señales continuas, y se caracterizan mediante ecuaciones diferenciales. Los

sistemas discretos trabajan con señales muestreadas, y quedan descritos mediante ecuaciones en diferencias.

Todo modelo matemático o paramétrico, por tanto, consta de una o varias ecuaciones que relacionan las entradas y salidas (en los modelos dinámicos la variable t -tiempo- juega también un papel primordial).

De ahí que a los modelos matemáticos, se les conozca más comúnmente como *modelos paramétricos*, ya que pueden definirse mediante una *estructura* y un *número finito de parámetros*.

2.1.3.- Métodos de obtención de Modelos.

Existen dos métodos principales para obtener el modelo de un sistema:

- a) Modelado teórico. Se trata de un método analítico, en el que se recurre a las leyes básicas de la física, para describir el comportamiento dinámico de un fenómeno o proceso.
- b) Identificación del sistema. Se trata de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema, a partir de datos reales recogidos de la planta bajo estudio.

El modelado teórico tiene un campo de aplicación restringido a procesos muy sencillos de modelar, o a aplicaciones en que no se requiera gran exactitud en el modelo obtenido. En muchos casos, además, 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 de sistemas.

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

- 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).
- 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.

En la práctica, lo ideal es recurrir a una combinación de ambos métodos de modelado para obtener el modelo final. El uso de datos reales para identificar los parámetros del modelo provee a éste de una gran exactitud,

pero el proceso de identificación, se ve tanto más facilitado cuanto mayor sea el conocimiento, sobre las leyes físicas que rigen el proceso.

2.1.4.- Consideraciones prácticas sobre identificación.

En éste apartado se revisan algunas consideraciones prácticas a tener en cuenta durante el proceso de identificación.

2.1.4.1.- Obtención de los datos.

El primer paso dentro del proceso de identificación, es realizar algún tipo de experimento sobre el sistema bajo estudio para obtener los datos de entrada-salida, que servirán de base para la obtención del modelo final.

Para que el proceso de identificación sea satisfactorio, es necesario que los datos utilizados para tal fin, contengan información significativa sobre el sistema. Esto implica un cuidadoso diseño del experimento de adquisición de datos, debiéndose tomar una serie de decisiones respecto a las señales que deben ser medidas, el periodo de muestreo a utilizar, el tipo de entrada más adecuada, el número de datos a almacenar, etc.

2.1.4.2.- Elección de la señal a medir.

La primera decisión es qué señales se deben registrar (mediante algún tipo de sistema de adquisición, y el correspondiente sistema de almacenamiento de datos), y qué señales deben ser manipuladas para excitar al sistema durante el experimento. Se debe tener en cuenta que pueden existir señales que, aunque afecten a la evolución de la salida, no pueden considerarse como entradas debido a la imposibilidad de actuar sobre ellas. En el caso de que estas señales puedan ser medidas, pueden considerarse también como entradas al sistema (midiéndose sus valores durante el experimento). En caso contrario, deben ser consideradas como perturbaciones.

2.1.4.3.- Elección del tipo de entradas.

Las entradas al sistema deben ser cuidadosamente elegidas de forma que los datos obtenidos proporcionen toda la información posible sobre el sistema. A este respecto, conviene tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La señal de entrada debe contener el mayor número de frecuencias posibles. Por ejemplo, una señal senoidal pura no es adecuada en un experimento de identificación, puesto que sólo se obtendrá la respuesta del sistema para la frecuencia de dicha señal. Por el contrario, las

señales escalonadas (con cambios bruscos) son muy utilizadas, puesto que contienen un espectro suficientemente amplio de frecuencias.

- Para sistemas lineales, basta con utilizar dos niveles de entrada, preferiblemente barriendo todo el rango de variación permitido. En éste tipo de sistemas se suelen utilizar señales binarias de duración aleatoria (conocidas como señales binarias aleatorias o pseudoaleatorias), como la mostrada en la Figura 07. Sin embargo, para sistemas no lineales es necesario trabajar con más de dos niveles de entrada, como se muestra en la Figura 08.

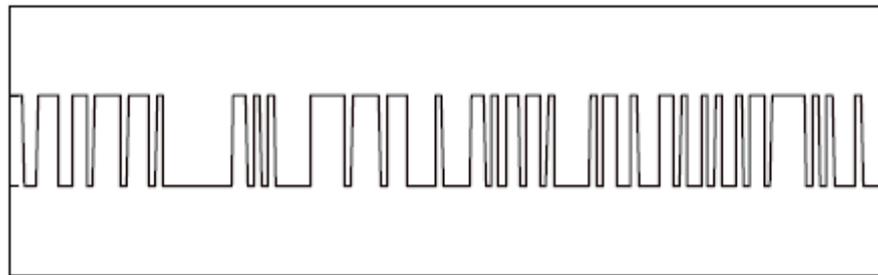


Figura 07. Entrada binaria aleatoria para sistemas lineales.

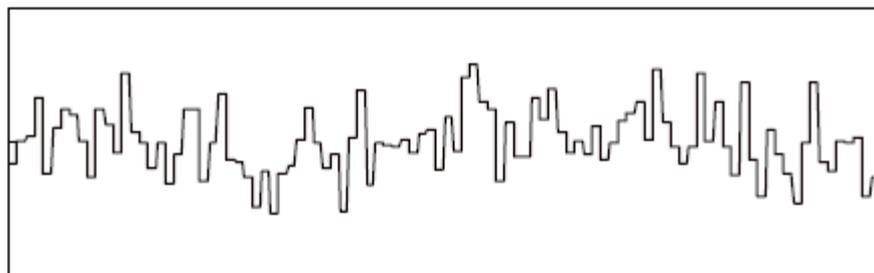


Figura 08. Entrada escalonada aleatoria para sistemas no lineales.

- Si se sabe que el sistema va a trabajar preferentemente en torno a un determinado punto de trabajo, es conveniente realizar el registro de

datos en ése mismo entorno. Este aspecto adquiere especial importancia si el sistema no es lineal.

2.1.4.4.- Elección del periodo de muestreo.

La elección del periodo de muestreo está directamente relacionada con las constantes de tiempo del sistema, y tiene una influencia decisiva en el experimento de identificación. Así, un período de muestreo muy pequeño puede llevar a la obtención de datos redundantes, que no aportan información sobre el sistema (pero sí ocupan espacio en la memoria del dispositivo de almacenamiento de datos), mientras que un período de muestreo demasiado grande provoca grandes dificultades a la hora de identificar la dinámica del sistema.

Una regla comúnmente usada, consiste en escoger una frecuencia de muestreo alrededor de diez veces el ancho de banda del sistema. Esto corresponde aproximadamente a muestrear en torno a cinco u ocho valores del tiempo de subida de la respuesta al escalón del sistema.

2.1.4.5.- Elección del número de muestras a tomar.

En principio, cuanta más información se tenga sobre el sistema, más exacto será el proceso de identificación. En la práctica, el número de muestras a

recoger durante el experimento de identificación, viene limitado por la capacidad del dispositivo de memoria utilizado. Por tanto, es importante llegar a un buen compromiso en la elección del período de muestreo y el número de muestras a tomar.

2.1.5.- Pre-tratamiento de los datos.

Los datos registrados pueden tener deficiencias que implican efectos devastadores en el resto del proceso de identificación, como son las siguientes:

- Presencia de perturbaciones de alta frecuencia, por encima de las frecuencias de interés en la respuesta del sistema.
- Datos claramente erróneos, producidos por fallos en el hardware o software utilizados en el experimento de recogida de muestras.
- Desviaciones, desplazamientos o perturbaciones de baja frecuencia.

A continuación, se verá la forma de tratar cada una de éstas deficiencias para conseguir unos datos adecuados para el proceso de identificación.

2.1.5.1- Elección de perturbación de alta frecuencia.

Estas perturbaciones se producen por fuentes de ruido ajenas al sistema y pueden ser evitadas mediante una correcta elección del período de muestreo. Si, tras el experimento, se observa que el período de muestreo escogido era innecesariamente pequeño (captándose por tanto estas perturbaciones indeseadas), se puede recurrir al diezmado de los datos, para evitar repetir el experimento con un período de muestreo mayor.

2.1.5.2- Eliminación de datos erróneos.

Estos datos suelen presentarse de forma aislada, pero pueden tener un efecto muy negativo en el proceso de identificación. Por tanto, es fundamental eliminarlos antes de iniciar el proceso.

Esto se realiza generalmente manualmente, eliminando dicho dato y aproximando su nuevo valor mediante interpolación. Para aplicaciones más avanzadas, existen algoritmos de detección de fallos que permiten corregir éstos datos de forma casi automática.

2.1.5.3- Tratamiento de niveles de continua.

Las perturbaciones de baja frecuencia, desplazamientos, desviaciones o variaciones periódicas en los datos de entrada-salida, pueden causar problemas si no son tratados convenientemente.

Los modelos paramétricos usados para identificación, responden a determinadas estructuras, como puede ser la ARX mostrada a continuación:

$$A(q^{-1}) \times y(t) = B(q^{-1}) \times u(t) + e(t) \text{ (ec.01)}$$

Se trata de una ecuación en diferencias que establece una relación lineal entre la secuencia de salida $y(t)$, la secuencia de entrada $u(t)$ y una fuente de ruido $e(t)$, siendo q^{-1} el operador retardo. Este modelo, en principio, debería caracterizar tanto la dinámica del sistema (variaciones en torno a un punto de trabajo), como su respuesta en régimen permanente, es decir, cuando $u(t)$ e $y(t)$ se estabilizan en un valor que llamaremos $u(0)$ e $y(0)$ respectivamente.

Para éste último caso, la ecuación anterior equivale a:

$$A(1) y(0) = B(1) u(0) \text{ (ec.02)}$$

En la práctica, los valores obtenidos para la identificación ($y_m(t)$ y $u_m(t)$), se miden en unidades físicas, cuyos niveles pueden ser arbitrarios. Por tanto, una vez encontrados los polinomios $A(q^{-1})$ y $B(q^{-1})$ de la ecuación (ec.01) que satisfacen la dinámica del sistema, es muy probable que no cumplan la ecuación (ec.02) que relaciona sus niveles de continua. Y en el caso de que se desee encontrar dos polinomios $A(q^{-1})$ y $B(q^{-1})$ que satisfagan simultáneamente las características estáticas y dinámicas del sistema, éstos

polinomios deben ser de un grado muy superior al realmente necesario para describir el sistema. Luego se hace necesario aportar una solución a la presencia de niveles de continua en los datos obtenidos para identificación.

Existen distintas vías para solucionar el problema anterior, algunas de las cuales se comentan a continuación:

Si la planta bajo estudio va a trabajar en torno a un punto de trabajo conocido, basta con modelar el comportamiento del sistema en torno a dicho punto de operación. Por tanto, el modelo sólo debe satisfacer las condiciones dinámicas del sistema, no debiendo cumplir la relación (ec.02).

2.1.6.- Validación del Modelo.

En todo proceso de identificación, es conveniente probar varias estructuras y diferentes órdenes dentro de cada estructura, hasta dar con el modelo que mejor se ajuste a los datos obtenidos experimentalmente de la planta real. En definitiva, se trata de determinar cuándo un determinado modelo es lo suficientemente exacto para la aplicación requerida, proceso que se conoce habitualmente como *validación del modelo*.

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. A continuación se

exponen algunos criterios típicos a la hora de descartar o elegir unos modelos respecto a otros.

a) Validación en base a la aplicación del modelo.

Puesto que en la práctica es imposible determinar si un modelo responde exactamente al comportamiento de un sistema real, suele ser suficiente comprobar que el modelo es capaz de resolver el problema para el cuál ha sido hallado (simulación, predicción, diseño de un controlador, etc.). Así, por ejemplo, si el controlador que ha sido ajustado por medio del modelo da buen resultado sobre el sistema real, se puede asegurar que el modelo era 'válido' para esta aplicación.

b) Comprobación de parámetros físicos.

Para una determinada estructura que haya sido parametrizada en función de magnitudes físicas, un método importante de validación consiste en comparar el valor estimado de dichos parámetros, y el que sería de esperar mediante el conocimiento previo que se tiene de la planta.

c) Coherencia con el comportamiento de entrada-salida.

Para determinar si el comportamiento de entrada-salida está suficientemente caracterizado, puede ser necesario recurrir a diferentes

métodos de identificación y comparar los resultados obtenidos. Por ejemplo, comparando los diagramas de Bode de los modelos obtenidos mediante identificación paramétrica de diferentes estructuras, por el método de variables instrumentales y por análisis espectral, se puede determinar si la dinámica del sistema ha quedado suficientemente caracterizada.

d) Reducción del modelo.

Un procedimiento para determinar si un modelo proporciona una descripción simple y apropiada de un sistema consiste, en aplicarle algún método de reducción de modelos. Si una reducción en el orden del modelo no produce alteraciones apreciables en el comportamiento de entrada-salida del mismo, entonces el modelo original era innecesariamente complejo.

e) Intervalos de fiabilidad de parámetros

Otro método para determinar si el modelo bajo estudio contiene demasiados parámetros, consiste en comparar los parámetros estimados con su desviación estándar. Si el intervalo de confianza de un parámetro contiene el valor cero, se debe considerar la posibilidad de eliminar dicho parámetro.

2.2.- FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE CONTROL EN TIEMPO CONTINUO.

2.2.1.- Introducción a Sistemas Continuos.

Si las señales que procesa un sistema están definidas en un intervalo continuo de tiempo, el sistema es denominado de Tiempo Continuo. Un sistema de este tipo se representa gráficamente como se muestra en la figura de abajo, donde $y(t)$ es la salida y $u(t)$ es la entrada (Ver Figura 09).

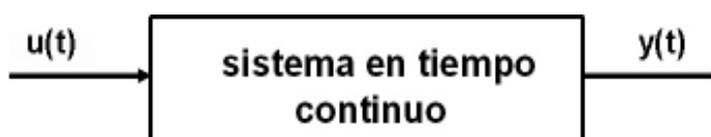


Figura 09. Salida $y(t)$ ante entrada $U(t)$.

De todos los sistemas, los de mayor importancia práctica son los lineales invariantes en el tiempo (LTI, del inglés “linear time invariant”).

Una ecuación diferencial general lineal de orden N con coeficiente constante está dado por:

$$\sum_{k=0}^N a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} = \sum_{k=0}^M b_k \frac{d^k x(t)}{dt^k} \quad (\text{ec.03}).$$

La solución de ésta ecuación diferencial es igual a la suma de la solución de la ecuación homogénea, y la solución de la ecuación particular; en otras palabras, un sistema descrito por dicha ecuación diferencial responde ante una entrada $x(t)$ con una salida $y(t)$ Es decir:

$$y(t) = y_h(t) + y_p(t). \quad (\text{ec.04}).$$

La primera parte de la ecuación anterior, es la respuesta natural o solución homogénea del sistema o respuesta transitoria, denominada así ya que si el sistema es estable desaparecerá para $t \rightarrow \infty$. Esta respuesta es debida a la historia pasada del sistema (*condiciones iniciales*) y a la inercia interna del sistema (dinámica interna) para oponerse a la aplicación de la entrada. Su forma depende solo de las raíces de la ecuación característica. A $y_p(t)$ se lo conoce como la respuesta forzada o solución particular o respuesta permanente. Esta respuesta permanente es debida a la entrada y tiene la misma forma de la función de entrada.

2.2.2.- Respuestas en el tiempo de Sistemas Continuos.

Una vez que se obtiene una representación matemática de un subsistema, ésta debe ser analizada para observar sus respuestas transitoria y en estado estable para ver si éstas características reproducen el comportamiento deseado. Los sistemas en tiempo continuo se los representan mediante una función transferencia en el plano frecuencial S , donde están los polos y ceros del sistema que representan la dinámica y el estado estable del proceso.

Polos, Ceros y respuesta de un sistema: Los **Polos** de una función de transferencia son los valores de “s” que hacen que la función de transferencia se vuelva infinita. De forma general en una función de transferencia factorizada, son los factores del denominador. Los **Ceros** de una función de transferencia son los valores de “s” que hacen que la función de transferencia sea igual a cero. De forma general en una función de transferencia factorizada, son los factores del numerador.

$$G(s) = \frac{(s + 2)}{s(s + 5)}$$

Cero en $s = -2$

Polo en $s = -5$

Polo en $s = 0$

2.2.3.- Sintonización de Controladores PID en tiempo Continuo.

Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones en estado transitorio y en estado estable del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. En éste caso, debemos recurrir a los enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID.

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de desempeño, se conoce como sintonización del controlador.

Ziegler y Nichols en 1942 desarrollaron un método empírico, para el ajuste de los reguladores PID. Estas técnicas de gran aceptación desde su surgimiento, han servido de base para métodos más recientes.

En base a las características de respuesta transitoria de una planta específica Ziegler y Nichols, propusieron unas reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d . Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o de la sintonización de los controles PID, la realizan los ingenieros en el sitio mediante experimentos sobre la planta.

Existen dos métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler-Nichols llamados:

Método de las oscilaciones permanentes

Método de las oscilaciones amortiguadas.

2.3.- FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE CONTROL EN TIEMPO DISCRETO.

2.3.1.- Introducción a los Sistemas de Control en Tiempo Discreto.

Siempre que en un sistema de control aparezca un microprocesador o elemento similar, dicho sistema se convertirá en un sistema de control discreto. En éste sistema el microprocesador o la microcomputadora hace la función de controlador, en éste caso el micro lo que tiene es un programa que contiene el algoritmo de control. La ventaja con relación a los controladores analógicos es que el algoritmo es ilimitado o sea, no tiene que ser el PID, además de muchas otras posibilidades como autodiagnóstico, linealización, ajuste del cero automático, etc.

Como las señales que procesa el microprocesador son discretas, es necesario agregar conversores al sistema, un conversor A/D para procesar la señal de error y conversor D/A para que el controlador pueda actuar sobre el proceso. Dado que los convertidores normalmente son de 10 o 12 bits, el error que introducen estos elementos es muy pequeño, dado por la cuantificación, y por ello en procesos industriales su efecto se puede despreciar.

El fijador de nivel tiene por función mantener el nivel de la señal entre los instantes de muestreo de modo que el sistema pueda operar. Este elemento será representado por un modelo matemático que influirá en la dinámica del sistema de control.

El muestreador o la acción de muestreo veremos que genera armónicos y por ello, deberá tenerse en cuenta la frecuencia a la que se muestrea la señal. A continuación se estudiará el muestreador y el fijador de nivel.

2.3.2.- El Muestreador.

El muestreador o acción de muestreo (Ver Figura 10) es la representación de la acción de muestrear y se identifica así:

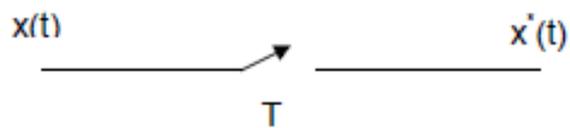


Figura 10. Muestreador.

T representa el período de muestreo, que en nuestro caso se considerará constante (Ver Figura 11).

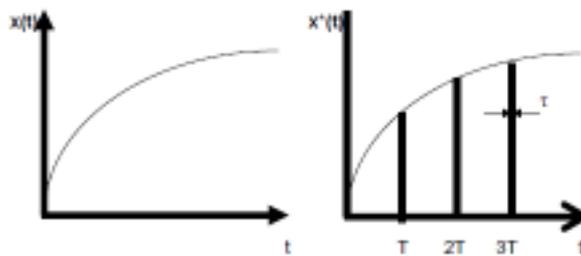


Figura 11. Período de muestreo T.

El ancho de los pulsos, τ , depende del tiempo que tarda en realizarse la acción de muestreo. Este proceso se puede representar como el producto de un tren de pulsos (Ver Figura 12) por la señal original o sea,

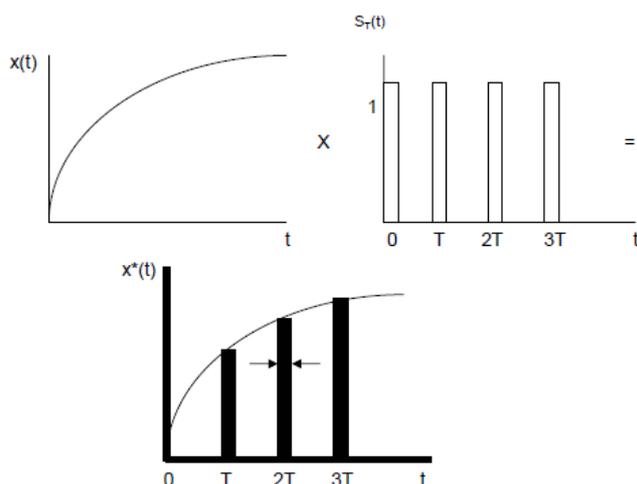


Figura 12. Producto tren de pulsos por la señal original.

De la figura anterior se ve que surge un tren de pulsos de ancho τ y que para su análisis es bastante complejo, pero si el ancho del pulso es despreciable con respecto al tiempo de muestreo, y a la constante de tiempo principal del proceso, el tren de pulsos se puede sustituir (Ver Figura 13) por un tren de impulsos o sea,

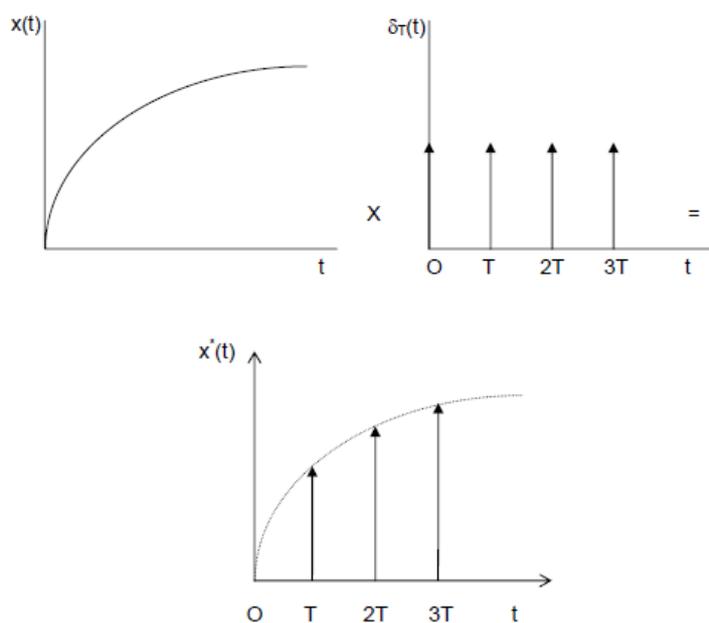


Figura 13. Tren de impulsos.

El tren de impulsos viene dado por

$$\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT)$$

Como

$$x^*(t) = x(t) \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT)$$

y si se supone que $x(t) = 0$ para $t < 0$ entonces

$$x^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) \delta(t-nT)$$

Aplicando transformada de Laplace, se tiene que

$$X^*(s) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT)e^{-nTs}$$

$$X^*(s) = 1/T \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(s + jn\omega_m)$$

Esta será la expresión que se utilizará para obtener la transformada z de funciones. Como el tren de pulsos es periódico, si se le aplica la serie de Fourier se obtiene otra expresión para la señal muestreada, sea

$$X^*(s) = 1/T \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(s + jn\omega_m)$$

Esta última ecuación se utilizará cuando se trabaje con los diagramas de bloques.

2.4.- FUNDAMENTOS DE CONTROL ADAPTATIVO.

2.4.1.- Introducción al Control Adaptativo.

El Control Predictivo (Model Predictive Control, MPC) se desarrolló a finales de los setenta y ha tenido un desarrollo considerable desde entonces. El término Control Predictivo no designa a una estrategia de control particular, sino a un conjunto de métodos de control que hacen uso explícito de un modelo del proceso, para obtener la señal de control minimizando una función objetivo. Estos métodos de control llevan a controladores que tienen básicamente la misma estructura y los mismos elementos:

- Uso explícito de un modelo para predecir la evolución del proceso en los instantes futuros.
- Minimización de una función objetivo y
- Utilización de un horizonte de control finito y deslizante que implica el cálculo de la secuencia de control para todo el horizonte, pero con la aplicación de la primera señal de la secuencia y la repetición de todo el proceso en el siguiente instante de muestreo.

Los distintos algoritmos de control predictivo difieren en el tipo de modelo utilizado para representar al proceso, y a las perturbaciones y la función objetivo considerada. Existen aplicaciones de control predictivo a diversos procesos, que van desde procesos tan diversos como robots (Gómez Ortega y Camacho, 1996) a la anestesia clínica (Linkers y Mahfonf, 1994). Aplicaciones en la industria de cemento, desecadoras, brazos robóticas se pueden encontrar descritas en (Clarke, 1988), mientras que desarrollos para columnas de destilación, plantas de pvc, generadores de vapor y servos se presentan en (Richalet, 1993) y (Richalet, 1978). El control predictivo presenta una serie de ventajas sobre otros métodos, entre las que se pueden citar las siguientes:

- Es una técnica particularmente atractiva para los operadores que requiere pocos conocimientos de control, porque los conceptos son muy intuitivos y la sintonización relativamente simple.
- Se puede utilizar para controlar una gran variedad de procesos, desde procesos muy simples, hasta procesos con dinámicas complejas como procesos con grandes tiempos muertos, procesos de fase no mínima, procesos inestables o procesos multivariables.
- Su carácter predictivo lo hace compensar intrínsecamente los tiempos muertos.
- Introduce un control anticipativo (feedforward) y de forma natural se compensan las perturbaciones medibles.
- La ley de control resultante es fácilmente implementable.
- Es muy útil cuando se conocen las referencias futuras, como ocurre en el caso de robótica o procesos por lotes.
- Permite tratar las restricciones de una forma sistemática y conceptualmente muy simple durante la fase de diseño.

Como es lógico, tiene también sus inconvenientes. El principal es que, aunque su implementación no es compleja, resulta más difícil que la de los clásicos controladores PID. Si la dinámica del proceso no cambia y no existen restricciones, la mayor parte de los cálculos se puede realizar fuera de línea y el controlador resultante es simple, pudiéndose aplicar a procesos

de dinámicas rápidas; en caso contrario, los requisitos de cálculo es mucho mayor. Aunque hay que decir que debido a la potencia de los computadores actuales esto no es realmente una dificultad insalvable. La mayor dificultad que presenta para su aplicación es la necesidad de un modelo apropiado del proceso cuya obtención, requiere unos conocimientos mínimos de control. El control predictivo ha demostrado ser en la práctica una estrategia razonable de control y ha sido aplicado con éxito a numerosos procesos industriales.

2.4.2.- Estrategia del Modelo de Control Predictivo - MPC

La metodología de todos los controladores pertenecientes a la familia MPC se caracteriza por la siguiente estrategia (Ver Figura 14).

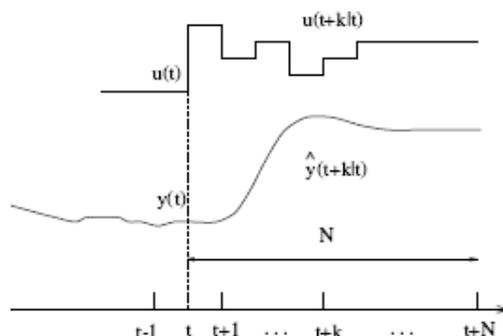


Figura 14. Estrategia de los controladores MPC.

Las salidas futuras para un horizonte determinado N , llamado horizonte de predicción, se predicen cada instante t utilizando el modelo del proceso. Estas predicciones de la salida $y(t+k | t)$ para $k = 1 \dots \dots \dots N$ dependen de los valores conocidos hasta el instante t (entradas y salidas conocidas) y de

las señales de control $u(t + k | t)$, $k = 0 \dots\dots N-1$, que han de ser calculadas y enviadas al sistema.

La secuencia de señales de control futuras, se calcula minimizando un criterio para mantener al proceso lo más cerca posible de la trayectoria de referencia $w(t + k)$. Este criterio toma normalmente la forma de una función cuadrática del error entre la salida predicha y la trayectoria de referencias futuras. En la mayor parte de los casos se incluye también el esfuerzo de control dentro de la función objetivo. La solución explícita se puede obtener cuando el criterio es cuadrático y el modelo lineal; en caso contrario se ha de utilizar un método numérico para buscar la solución.

La señal de control $u(t | t)$ se envía al proceso mientras que el resto de las señales calculadas no se consideran, ya que en el instante siguiente de muestreo $y(t + 1)$ es ya conocida y los pasos anteriores se repiten con éste nuevo valor. Por lo que $u(t + 1 | t + 1)$ se calcula con información diferente y en principio será también diferente de $u(t + 1 | t)$.

La Figura 15 muestra la estructura básica necesaria para implementar el control predictivo. Se usa un modelo para predecir la evolución de la salida o estado del proceso a partir de las señales de entrada y salidas conocidas. Las

acciones de control futuras se calculan con el optimizador, que considera la función del coste y las posibles restricciones.

El modelo de proceso juega, en consecuencia, un papel decisivo en el controlador. El modelo elegido debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso para predecir de forma precisa la evolución del sistema. Al mismo tiempo, debe ser suficientemente simple de implementar y entender.

Las distintas metodologías del control predictivo difieren fundamentalmente en el tipo de modelo utilizado.

El optimizador es otra parte fundamental de la estructura ya que permite obtener las acciones de control a aplicar. Si la función de coste es cuadrática, el modelo lineal y no existen restricciones, se puede obtener una solución explícita. Si éste no es el caso se ha de acudir a un algoritmo numérico de optimización que requiere mayor capacidad de cálculo. El tamaño del problema resultante depende del número de variables, de los horizontes de control y predicción y del número de restricciones, aunque se puede decir que en general problemas de optimización resultantes en éste contexto son problemas más bien modestos.

Nótese que la estrategia de control predictivo es muy similar a la estrategia que se utiliza cuando se conduce un automóvil. El conductor conoce la trayectoria de referencia deseada para un horizonte de control finito. Tomando en consideración las características del automóvil (modelo mental del automóvil) decide que acción de control tomar (acelerador, frenos, volante, marchas) para seguir la trayectoria deseada. Sólo la primera acción de control de la secuencia calculada mentalmente, es aplicada por el conductor en cada instante y el procedimiento se repite en los sucesivos instantes utilizando el concepto de horizonte deslizante.

Nótese que cuando se utiliza un esquema de control clásico como PID se utilizan sólo las señales pasadas. Esta forma de conducir el automóvil será como conducir utilizando el espejo retrovisor. Esta analogía no es totalmente justa con los PIDs, porque el control predictivo utiliza más información (trayectoria de referencia). Nótese que si se le proporciona al PID como referencia un punto en la trayectoria futura, la diferencia entre ambas estrategias de control no parecerá tan abismal.

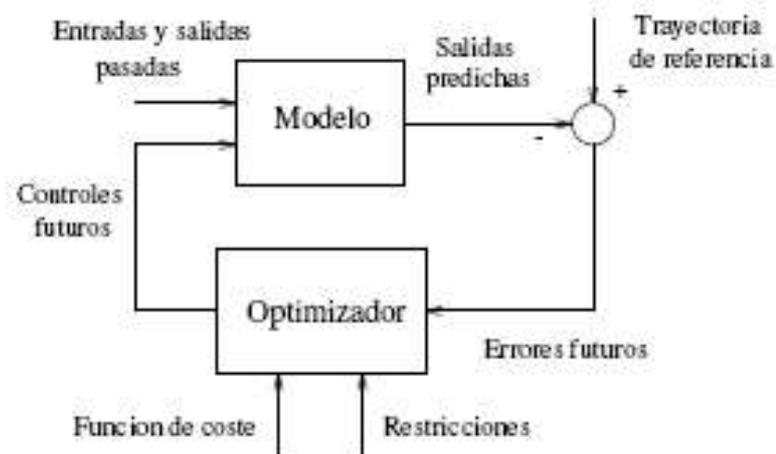


Figura 15. Modelo para predecir el estado de la salida.

2.4.3.- Control Adaptativo de Ganancia Programada.

La ganancia programada es una técnica clásica, de amplio uso en la industria, la misma es más conocida por su denominación anglosajona "gain scheduling", y constituye una forma de atacar la restricción local de la técnica de linealización de las ecuaciones no lineales de un sistema. La mencionada técnica es, en esencia, una aproximación intuitiva y profundamente heurística que ha cobrado fuerza e interés en la comunidad científica debido a su éxito en una amplia variedad de problemas de control.

El procedimiento general de tal técnica evoluciona en los siguientes términos:

1. Linealizar las ecuaciones dinámicas del sistema no lineal alrededor de un conjunto de puntos de equilibrio.
2. Determinar un controlador para cada modelo lineal, a través de un método convencional de sistemas lineales invariantes en el tiempo (LTI).
3. Construir una ley de control global, que puede consistir en la interpolación de parámetros de los controladores locales.
4. Asegurar la estabilidad y el desempeño del sistema no lineal, a lo largo de los puntos intermedios mediante simulaciones intensivas.

El método de ganancia programable se puede considerar un control adaptativo no lineal, en el sentido que se realiza con un controlador lineal cuyos parámetros cambian en función de las condiciones de operación según una ecuación o una tabla precalculada. Los algoritmos de control fueron implementados en plataforma Labview.

Un controlador adaptativo, es aquel que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del proceso y en las perturbaciones. El control adaptativo puede controlar sistemas con parámetros constantes ó sistemas con parámetros variables. La idea básica del control adaptativo es estimar on-line las variaciones de los parámetros de la planta, basándose en la medida de las señales de entrada – salida de la planta, y en el uso de los

parámetros estimados. El control por ganancia programable, se refiere a un sistema donde los parámetros del controlador varían dependiendo de las condiciones de operación medidas. La variable programable puede ser el set-point, la variable controlada ó una señal externa. La técnica de la ganancia programable es un acercamiento al control de sistemas no lineales que utiliza una familia de controladores lineales, para proporcionar el control adecuado en diversos puntos de funcionamiento del sistema. Para sintonizar el controlador se utilizan una o más variables llamadas variables a programar o variables de ajuste.

La clave para el buen diseño del control está en la selección de dichas variables, pues con ellas se toma la decisión para el cambio o para el cálculo de los parámetros del controlador. Esta selección debe estar basada en el conocimiento de la dinámica del sistema. Una vez seleccionadas las variables, se calculan los parámetros del regulador para varios puntos de operación en base a una adecuada estrategia de control. El comportamiento dinámico y la estabilidad del sistema se deben evaluar inicialmente por simulación, debido a la complejidad propia de las no linealidades involucradas en los cambios de zonas de operación. La literatura no documenta reglas generales para el diseño de controladores con ganancia programable. Sin embargo, se pueden establecer los siguientes pasos:

Determinar las variables de ajuste: Estas variables deben reflejar las condiciones de operación de la planta, y permitir establecer expresiones simples que relacionen los parámetros del controlador con las variables de ajuste. Esto se hace normalmente mediante la identificación física del sistema.

Cálculo de los parámetros del controlador en diferentes zonas de operación: Se calculan los parámetros del controlador para un determinado número de condiciones de trabajo, en función de las variables de ajuste, empleando algún método de diseño apropiado. El controlador se ajusta para cada condición de operación. No existe una norma que precise el número de zonas o de puntos de operación en que debe dividirse el rango de operación de la planta, el diseñador decide al respecto.

Determinar el valor de los parámetros del controlador para cada cambio en la variable: con los valores de los parámetros obtenidos en el paso anterior, se puede obtener una ecuación de regresión que relacione los parámetros del controlador con la variable de ajuste.

2.5.- FUNDAMENTOS DE SISTEMAS SCADAS.

2.5.1.- Introducción.

SCADA (supervisory control and data acquisition), es un sistema industrial de mediciones y control que consiste en una computadora principal o “master” (generalmente llamada Estación Maestra, “Master Terminal Unit” o MTU); una o más unidades control obteniendo datos de campo (generalmente llamadas estaciones remotas, “Remote Terminal Units,” o RTU); y una colección de software estándar y/o a la medida usado para monitorear y controlar remotamente dispositivos de campo. Los sistemas SCADA contemporáneos exhiben predominantemente características de control a lazo abierto y utilizan comunicaciones generalmente interurbanas, aunque algunos elementos de control a lazo cerrado y/o de comunicaciones de corta distancia, pueden también estar presentes.

Sistemas similares a un sistema SCADA son vistos rutinariamente en fábricas, plantas de tratamiento, etc. Éstos son llamados a menudo como Sistemas de Control Distribuidos (DCS – “Distributed Control Systems”.) Tienen funciones similares a los sistemas SCADA, pero las unidades de colección o de control de datos de campo se establecen generalmente dentro de un área confinada. Las comunicaciones pueden ser vía una red de área local (LAN), y serán normalmente confiables y de alta velocidad. Un sistema

DCS emplea generalmente cantidades significativas de control a lazo cerrado.

2.5.2.- Hardware y Software.

Las MTU de sistemas SCADA se pueden implementar en la mayoría de las plataformas existentes. Los primeros sistemas existentes tendieron a ser propietarios y muy especializados, y donde fueron utilizados sistemas operativos de fines generales, tendieron a ser modificados ampliamente. Esto debido a que los requisitos de SCADA superaban los límites de la tecnología disponible en el momento, y por razones de desempeño ya que tendieron a proporcionar sistemas gráficos por encargo, a usar bases de datos en tiempo real (con gran parte de la base de datos en memoria), y a menudo el hardware debió ser modificado para estos requisitos particulares. La serie Digital Equipment Corporation PDP11 y el sistema operativo RSX11M, eran quizás la plataforma más común en los SCADA del siglo pasado. Posteriormente, Unix comenzó a ser el sistema operativo de más frecuente elección. Mientras la potencia de la PC aumentaba, los sistemas Intel llegaron a ser muy comunes, aunque las plataformas DEC Alfa, y otras estaciones de trabajo de fines elevados estén aún en uso. En épocas recientes Windows NT ha alcanzado alta aceptación dentro de la comunidad SCADA, aunque los sistemas muy grandes siguen siendo en la mayor parte de los

casos estaciones de trabajo Unix (QNX o Solaris), las cuales son más veloces en sus respuestas.

3.- DISEÑO DE LA SOLUCION.

Para el diseño de la solución y la correspondiente implementación de la técnica de control planteada, primero debemos entender, como es una la Planta de Generación de Energía Eléctrica, por lo que a continuación se muestra un diagrama de bloque del sistema en lazo abierto (Ver Figura 16).

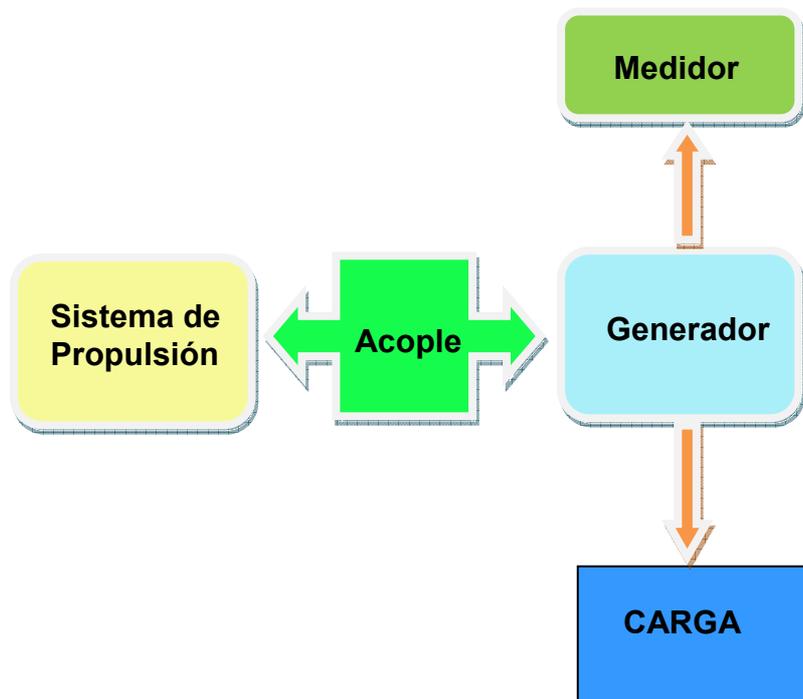


Figura 16. Sistema de Control en Lazo Abierto.

En la Figura 17 se puede apreciar cómo sería una planta de generación de energía en lazo cerrado, con el control Adaptativo de Ganancia Programada.

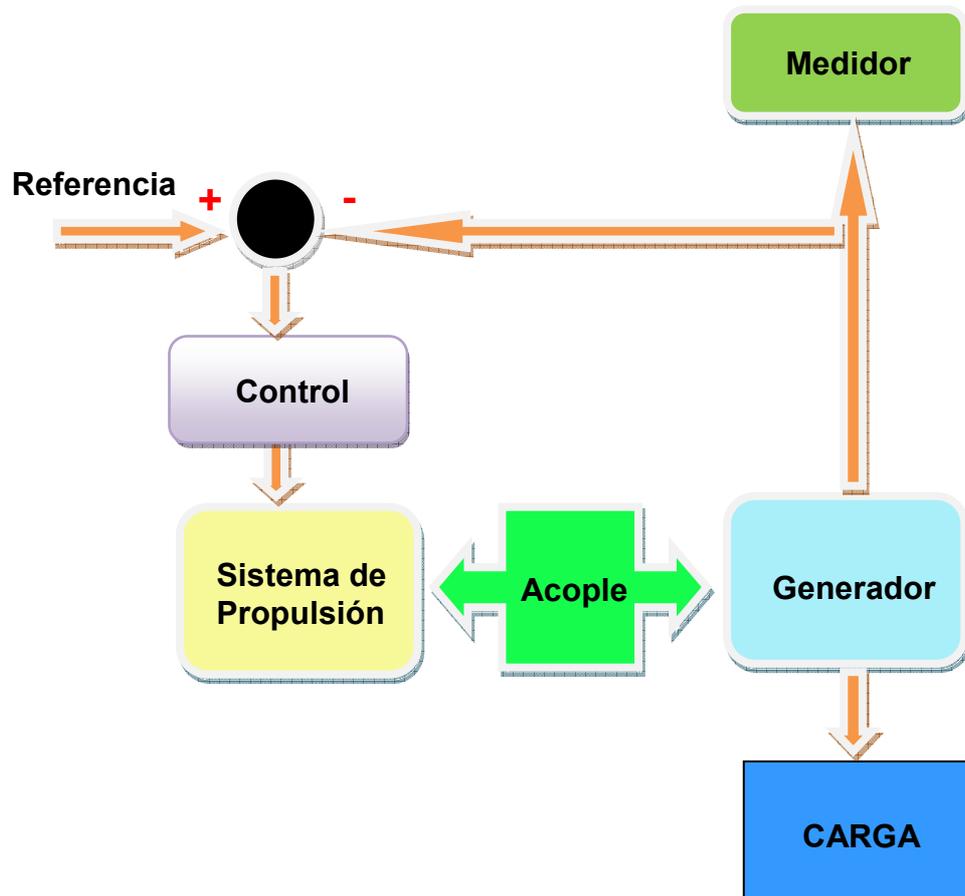


Figura 17. Sistema de Control en Lazo Cerrado.

En base a esto se decide:

- Puesto que no se dispone de un grupo electrógeno o planta de generación de energía eléctrica para esta investigación, se Construirá una planta de

generación de energía eléctrica, donde se pueda implementar el control Adaptativo de Ganancia Programada.

- Se construirá a través del software Labview 8.6, las pantallas de control requeridas, para efectuar el control e Identificación de dicha Planta.
- Una vez encontrada la Función de transferencia que representa la dinámica de la Planta para un determinado punto de operación, se procederá a sintonizar la Planta, para ese punto de operación.
- Después de obtener los diversos valores de K_p , K_i y K_d para los diversos puntos de operación de la Planta, se cerrara el Lazo de Control y se activará el Control Adaptativo de Ganancia Programada.

3.1.- DISEÑO DE LA PLANTA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA.

Se construirá una Planta de Generación de Energía Eléctrica, donde se pueda implementar la técnica de control propuesta, por lo que se buscará en el mercado los elementos necesarios para su ensamblaje.

Los componentes de la planta que serán usados para la medición y el control deben permitir la captura de datos y facilitar el control de la frecuencia de salida del sistema.

Para el diseño preliminar de la Planta, se usará el diagrama de bloques siguiente (Ver Figura 18 Diagrama de Bloques de la Planta a construir).

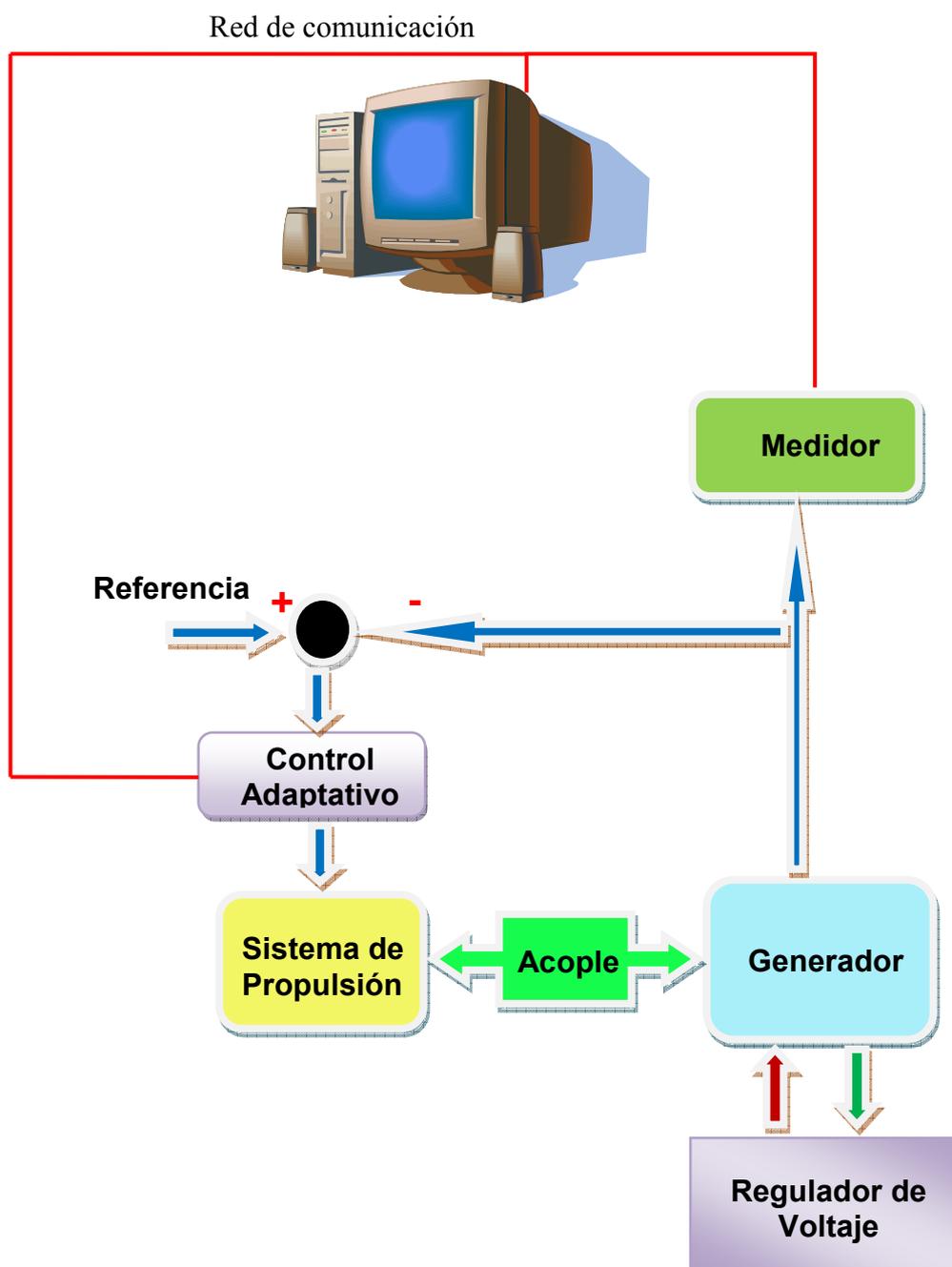


Figura 18. Diagrama de bloques de la Planta a Construir.

3.2.- DISEÑO DE PANTALLAS DE CONTROL.

Para la implementación de las pantallas de Control y Monitoreo Remoto se usará el software Labview versión 8.6, a través del cual se desarrollarán diversas pantallas de control para lograr la captura de datos, y la aplicación de las diversas técnicas de Identificación y sintonización de una Planta, que están disponibles en Labview, adicionalmente se desarrollaran nuevas pantallas para implementar la técnica de Control Adaptativo de Ganancia Programada.

3.3.- DISEÑO DE LA PRUEBA.

Una vez que la Planta y las pantallas de control estén habilitadas, el sistema estará en capacidad de encender la Planta de Generación de Energía Eléctrica y la llevaremos a los diversos puntos de operación requeridos (50Hz, 52Hz, 54Hz, 56Hz, 58Hz y 60 Hz). Cuando la Planta llegue a cada punto de operación, excitaremos la entrada con un ruido blanco y guardaremos los valores de entrada y salida del sistema, que nos servirán para encontrar las funciones de transferencia correspondientes a los diversos puntos seleccionados.

Con los datos guardados efectuaremos una Identificación No Paramétrica, de cada punto de operación, lo que nos dará datos valiosos que nos ayudarán en la Identificación Paramétrica.

Con la información obtenida en la Identificación No Paramétrica, iniciaremos la Identificación Paramétrica, la cual ayudará a encontrar la función de transferencia que mejor represente la dinámica del sistema.

Una vez encontradas las funciones de transferencia, sintonizaremos la Planta para obtener los correspondientes valores de K_p , K_i y K_d para los diversos puntos de operación.

Con los valores obtenidos de K_p , K_i y K_d , calcularemos los valores de T_i y T_d correspondientes, los que serán ingresados en la interface gráfica, para el apropiado trabajo del Control Adaptativo de Ganancia Programada.

Cuando se vuelva a encender la planta, se cerrará el lazo de control y verificaremos el comportamiento del sistema ante los diversos ajustes calculados, de ser requerido efectuaremos ajustes finos para mejorar el desempeño de la Planta. Si el comportamiento es el deseado se habrán cumplido los objetivos planteados en esta tesis.

4.- IMPLEMENTACION.

La implementación se ha dividido en 2 partes. En la primera parte se detalla el proceso de construcción, de una Planta de Generación de Energía, y cuáles fueron las principales consideraciones técnicas que se tomaron para la selección de los diversos componentes que forman la Planta, en la segunda parte se muestran las pantallas de control y monitoreo que se desarrollaron con el programa Labview 8.6, para implementar la técnica de Control de Ganancia Programada.

4.1.- CONTRUCCION DE LA PLANTA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA.

Para la construcción de la Planta de Generación, se efectuaron varias consideraciones técnicas, para la apropiada selección de los elementos principales de la Planta.

4.1.1.-Selección del Primo Motor para la Planta de Generación.

Para la selección del primo motor que propulsara la Planta de Generación, se tomaron en consideración los siguientes aspectos:

- Características de la carga.
- Potencia mecánica a impulsar.
- Revoluciones de giro del alternador.
- Tipo de acoplamiento entre primo motor y alternador.
- Disponibilidad del equipo en el mercado.
- Seguridad para los usuarios.

El primo motor que se seleccione, debe impulsar un alternador 24 Voltios de corriente continua, 65 amperios. Normalmente para producir energía los alternadores son accionados por una banda y una polea, que incrementa su velocidad entre 2.000 RPM y 4.000 RPM.

El alternador que se pre-seleccionó, será modificado para producir un voltaje entre 7 y 12 voltios de corriente alterna, con una frecuencia de 60 ciclos por segundo. Normalmente éste alternador produce corriente continua a 24 voltios con una potencia de salida aproximada de 1.500 vatios, girando a 4.000

revoluciones por minuto, por lo que del primer análisis efectuado se determina que, la máxima potencia que podría tener el motor eléctrico es de 1.500 vatios.

Tomando en consideración los aspectos anteriormente señalados, se decide emplear un motor eléctrico trifásico, marca Siemens de 2 Hp, de 230 voltios, de 900 RPM, 60 Hz, 8 polos, acoplado directamente al alternador (Ver Figura 19), los datos técnicos del motor están en el anexo 2.



Figura 19. Motor Eléctrico.

4.1.2.-Selección del Variador de Frecuencia.

Una vez seleccionado el primo motor, se procede a seleccionar al Variador de Frecuencia de acuerdo a los siguientes parámetros:

- Potencia eléctrica a controlar.

- Protocolo de comunicación.
- Puerto de comunicación.
- Entradas y salidas análogas.
- Entradas y salidas digitales disponibles.

El puerto que usaremos para la comunicación de datos desde y hacia el variador de frecuencia, será el puerto serial RS485. Además se debe seleccionar, un variador que tenga disponibles al menos una entrada análoga, para poder efectuar el control de velocidad externo del variador.

Tomando en consideración todos los aspectos anteriormente señalados, se decidió que se empleará un variador de frecuencia marca General Electric, modelo AF-60 LP, trifásico, 3 Hp, 60 Hz, con puerto de comunicación Modbus RS485, con entradas y salidas análogas y digitales (Ver Figura 20). Los datos técnicos del variador de frecuencia están en el Anexo 2.



Figura 20. Variador de Frecuencia.

4.1.3.-Selección del Módulo de Adquisición de Datos.

Se buscó un módulo de adquisición de datos, que cumpla con los requerimientos de la aplicación y que a su vez sea de bajo costo.

Por costos y compatibilidad con el software que usaremos, el módulo de adquisición de datos seleccionada, es de la marca National Instruments modelo DAQ 6008 (Ver Figura 21), la cual nos permitirá medir las señales de voltaje y la frecuencia de salida del alternador, también nos ayudará en el control del variador de velocidad. Los datos técnicos de la DAQ están en el Anexo 3.



Figura 21. Módulo DAQ 6008.

4.1.4.-Selección del Medidor de Energía.

El medidor seleccionado, es de la marca Power Measurement modelo 3710, con protocolo de comunicación Modbus y un puerto RS485. Lo que nos permitirá medir las señales de voltaje de salida del alternador, y transmitirla por la red de comunicación (Ver Figura 22). Los datos técnicos del medidor de energía están en el Anexo 4.



Figura 22. Medidor de Energía Power Measurement 3710.

4.1.5.- Selección del Convertidor de Señal de Comunicación.

El Convertidor de Señal de Comunicación servirá, para convertir las señales enviadas por el variador de frecuencia y el medidor de energía seleccionados, desde el puerto RS485 al puerto RS232, previo a ingresar al computador. Se seleccionó la tarjeta marca B&B Electronics modelo 485SD9TB (Ver Figura 23). Los datos técnicos de la tarjeta convertidora de protocolo están en el Anexo 5.



Figura 23. Convertidor de Protocolo de RS485 a RS232.

Luego de seleccionarse los componentes principales de la Planta, se procede a su adquisición y se inicia el proceso de ensamblaje. El componente de mayor importancia fue el grupo motor-alternador, el cual se acopló mediante un eje con una rueda dentada, de tal manera que el sistema motor-alternador quede montado y alineado en una sola estructura metálica (Ver Figura 24).



Figura 24. Grupo Motor-alternador

Luego se procede al diseño y construcción de la estructura metálica que contendrá todas las tarjetas y medidores respectivos (Ver Figuras 25 y 26).



Figura 25. Estructura Metálica.



Figura 26. Base Metálica de estructura

Se procede a la instalación de los diversos componentes sobre base metálica haciendo la correspondiente distribución de los elementos de fuerza y control (Ver Figura 27).



Figura 27. Montaje de Tarjetas

Pruebas de los diversos circuitos de control y fuerza que conforman el tablero de control (Ver Figura 28).



Figura 28. Proceso de cableado y prueba de equipos.

Ubicación final de tablero de control y los componentes del sistema que incluye, el medidor de energía, el variador de frecuencia, la tarjeta de adquisición de datos, el regulador de voltaje, transformador, disyuntores de protección y cableado respectivo (Ver Figura 29).

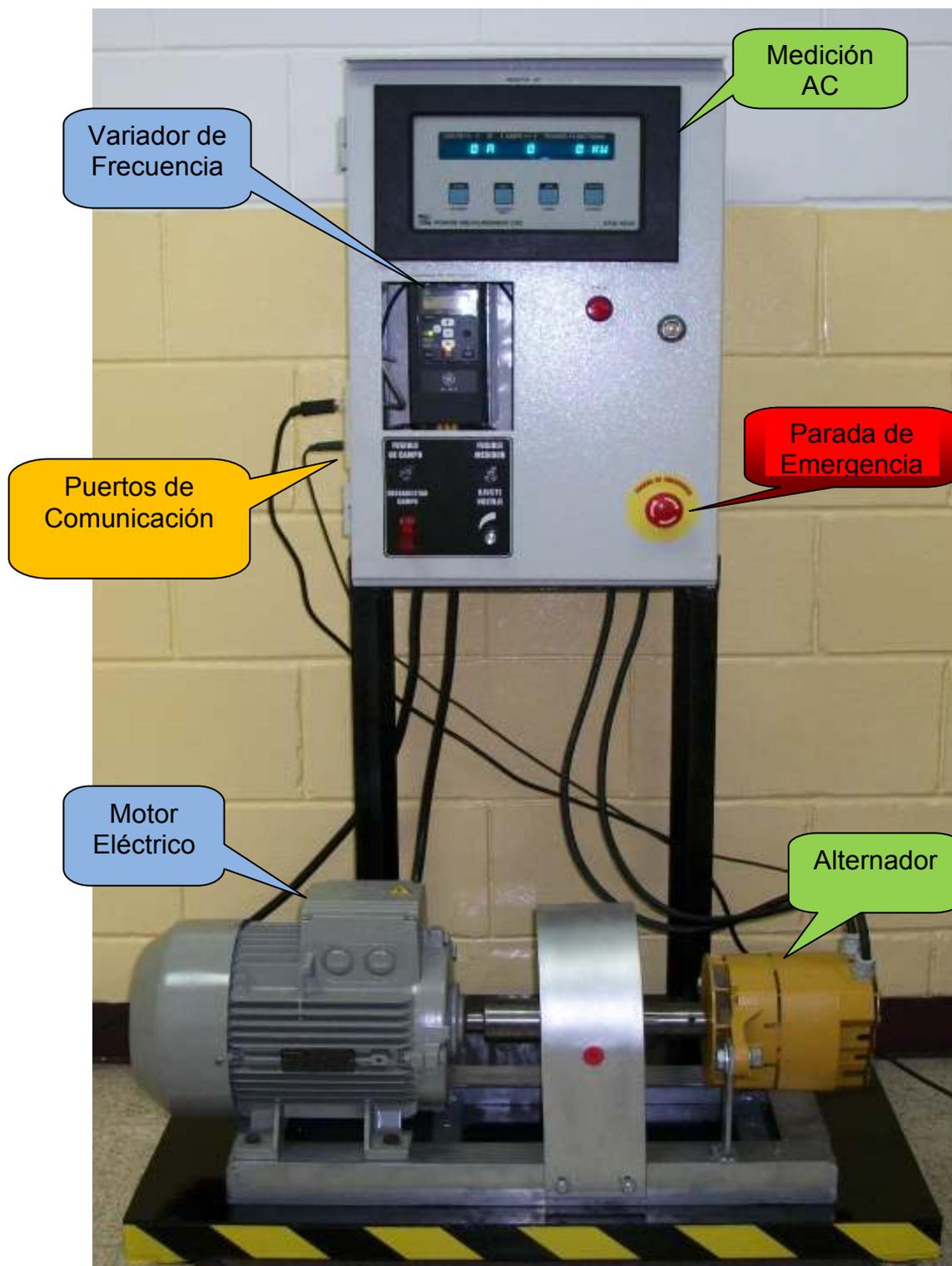


Figura 29. Planta terminada.

4.2.- IMPLEMENTACION DE PANTALLAS DE CONTROL.

Para la construcción de las pantallas de Control y Monitoreo Remoto se usó Labview versión 8.6, se desarrollaron 8 pantallas. En la primera pantalla se puede efectuar el arranque y parada remota de la planta (Ver Figura 30). Además se pueden ver otros parámetros de interés.



Figura 30. Pantalla de Control Principal

En la segunda pantalla tenemos los parámetros del Alternador (Ver Figura 31).

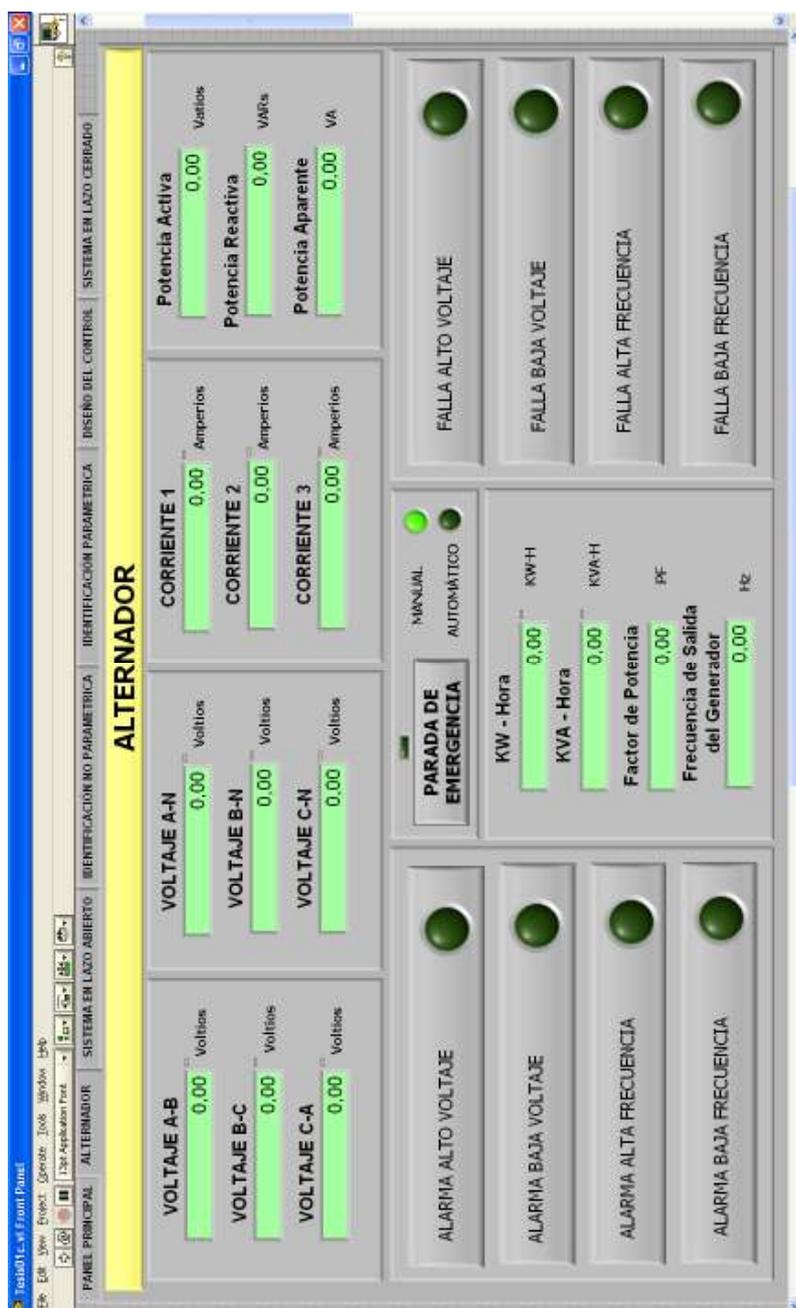


Figura 31. Pantalla de Parámetros del Alternador.

En la tercera pantalla tenemos el sistema de control en lazo abierto, adicionalmente se puede iniciar la captura de datos para iniciar la Identificación del Sistema (Ver Figura 32).

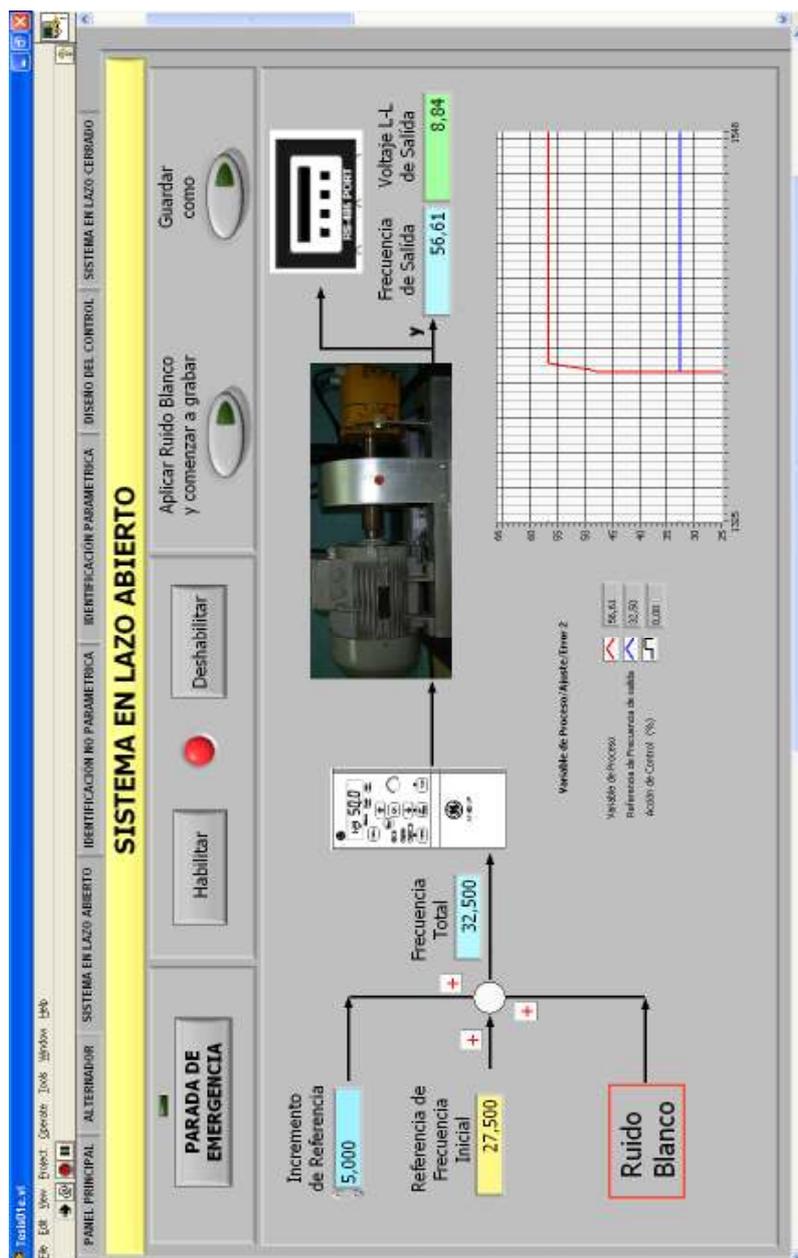


Figura 32 Pantalla de Sistema en Lazo Abierto.

En la cuarta pantalla tenemos la Identificación No Paramétrica del Sistema (Ver Figura 33).

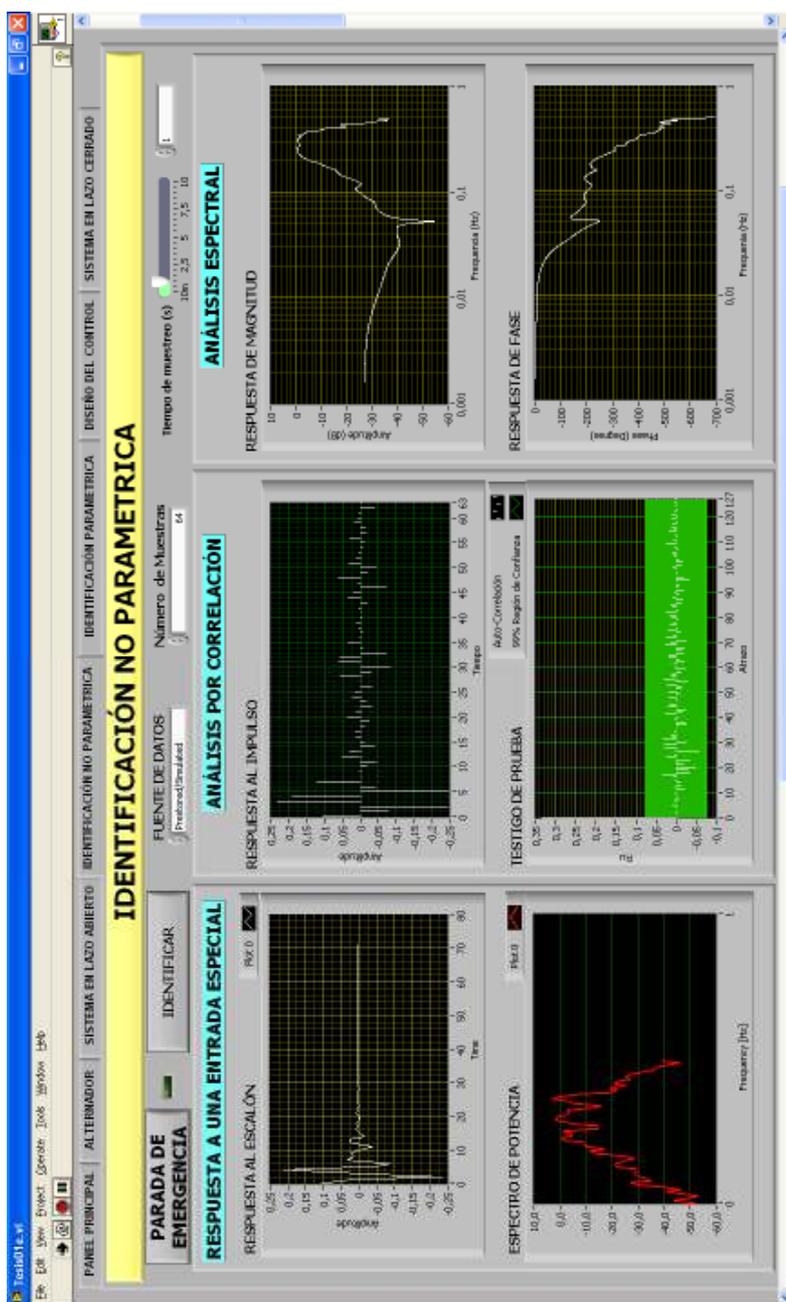


Figura 33. Pantalla de Identificación No Paramétrica.

En la quinta pantalla se efectúa la Identificación Paramétrica del Sistema, donde tenemos los modelos ARX, ARMAX, Output Error, Box Jenkins y General Lineal (Ver Figura 34).

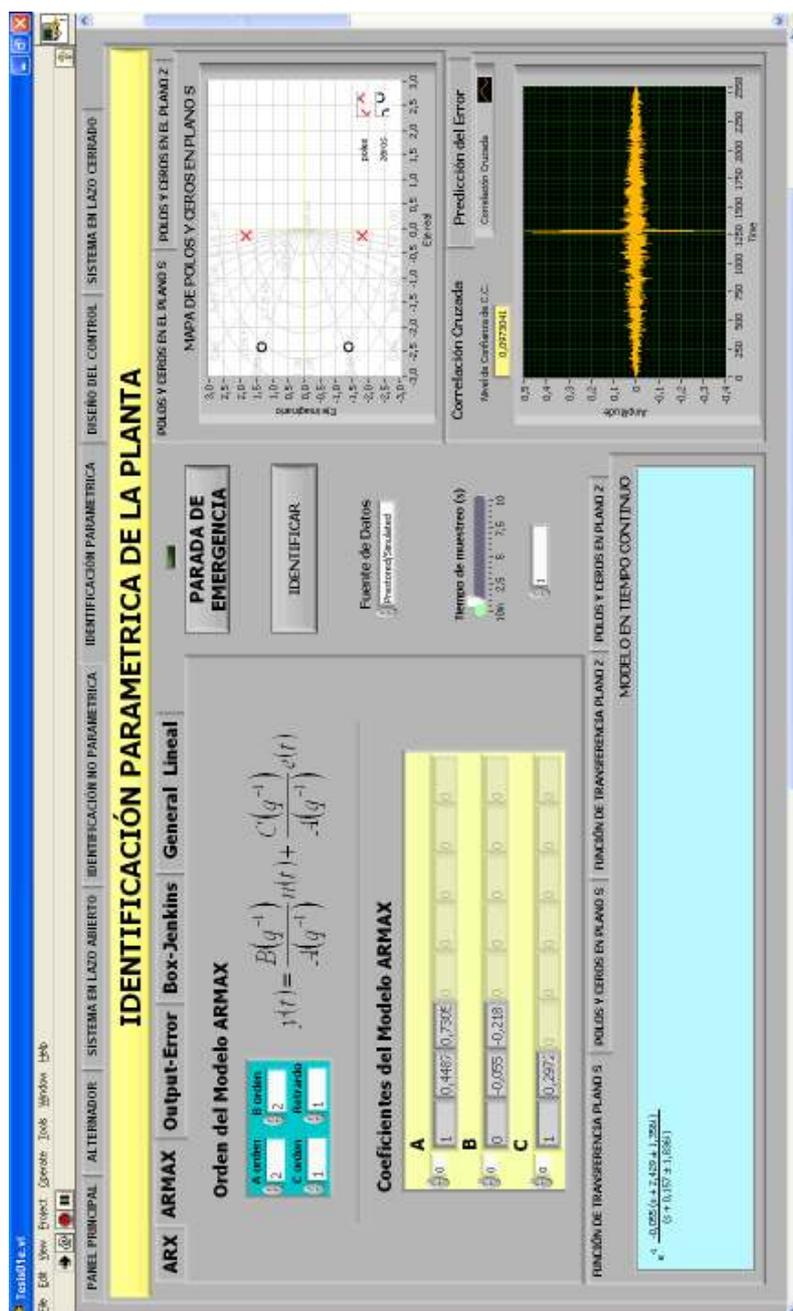


Figura 34. Pantalla de Identificación Paramétrica.

En la sexta pantalla se efectúa el ajuste del PID en continuo, para la ecuación de transferencia respectiva (Ver Figura 35).

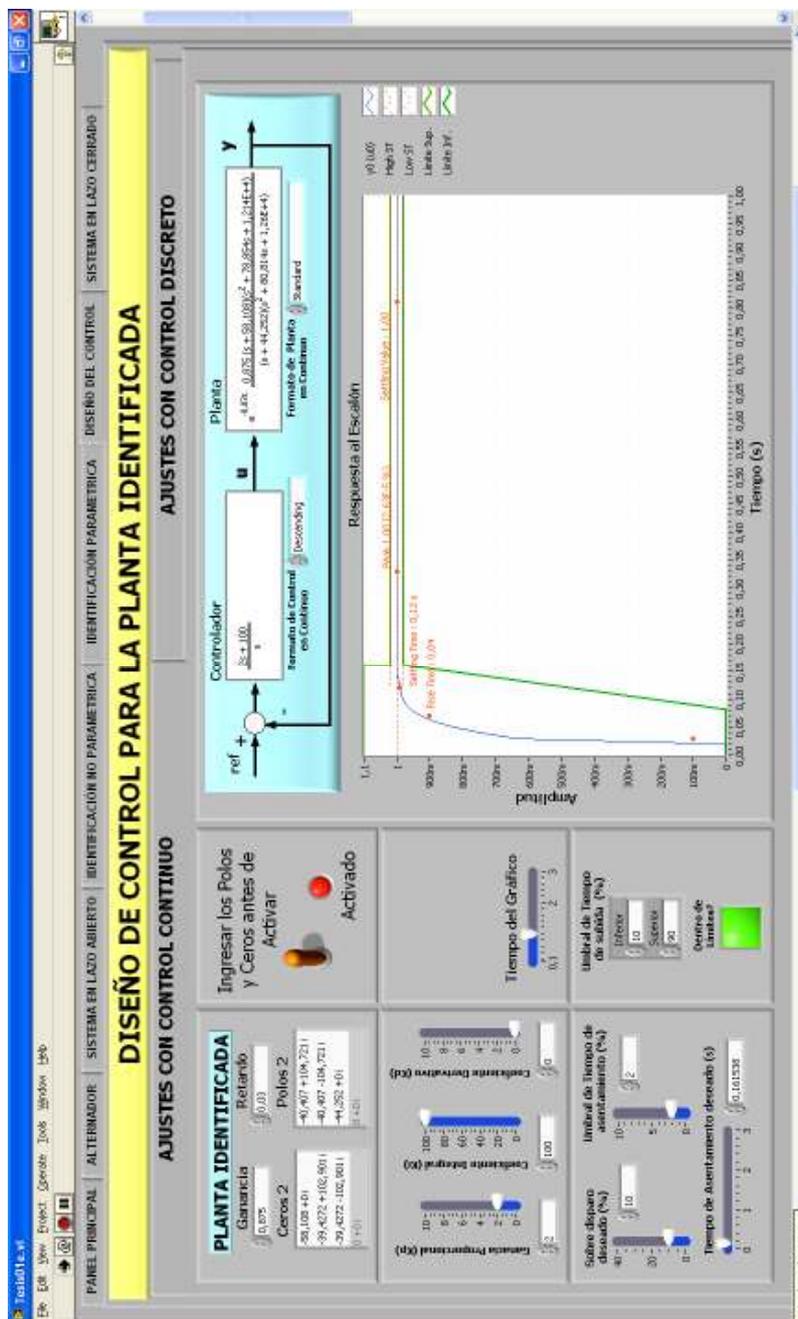


Figura 35. Pantalla de Diseño de Control en tiempo Continuo.

En la séptima pantalla se efectúa el ajuste del PID en tiempo discreto, para la ecuación de transferencia respectiva (Ver Figura 36).

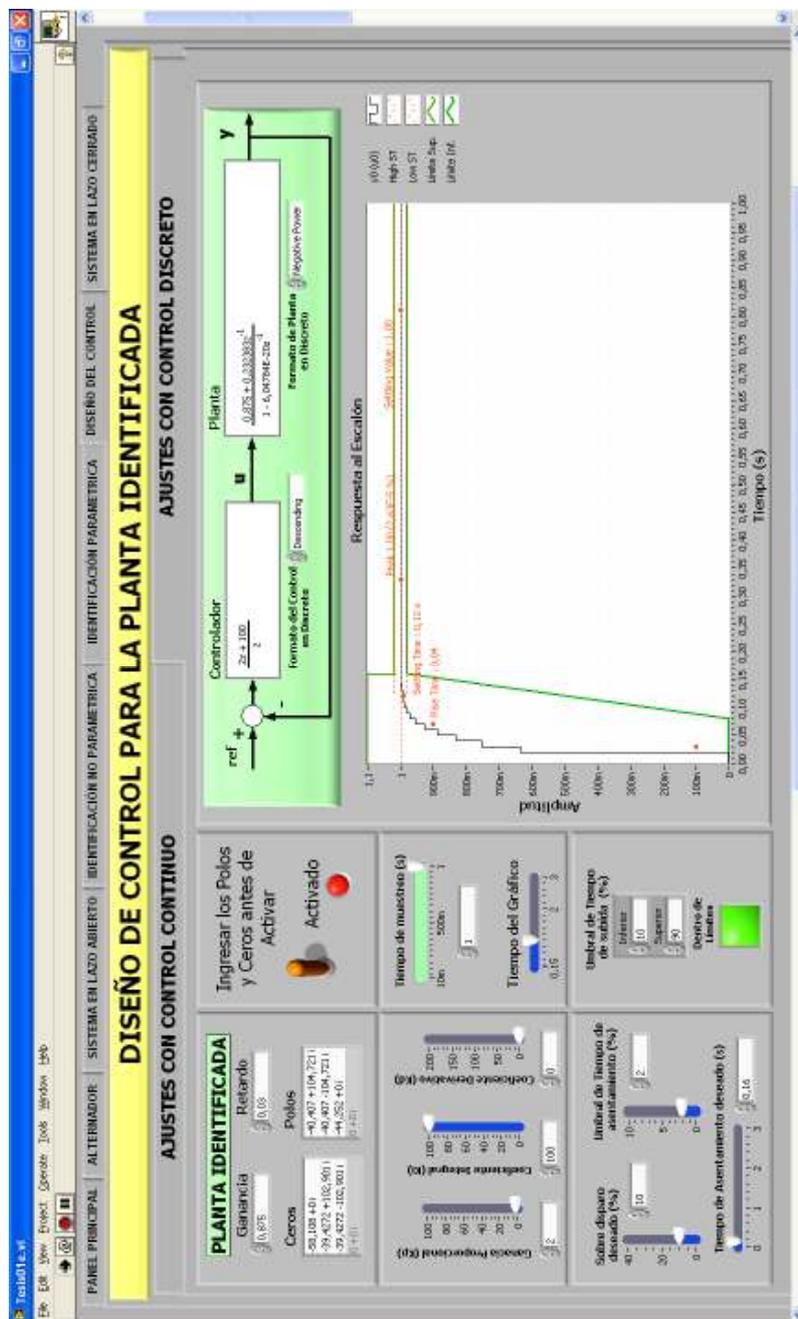


Figura 36. Pantalla de Diseño de Control en tiempo Discreto.

En la octava pantalla se puede llenar la tabla de los valores PID obtenidos para activar el Control Adaptativo de Ganancia Programada, adicionalmente se puede ordenar el cierre del lazo de control (Ver Figura 37).

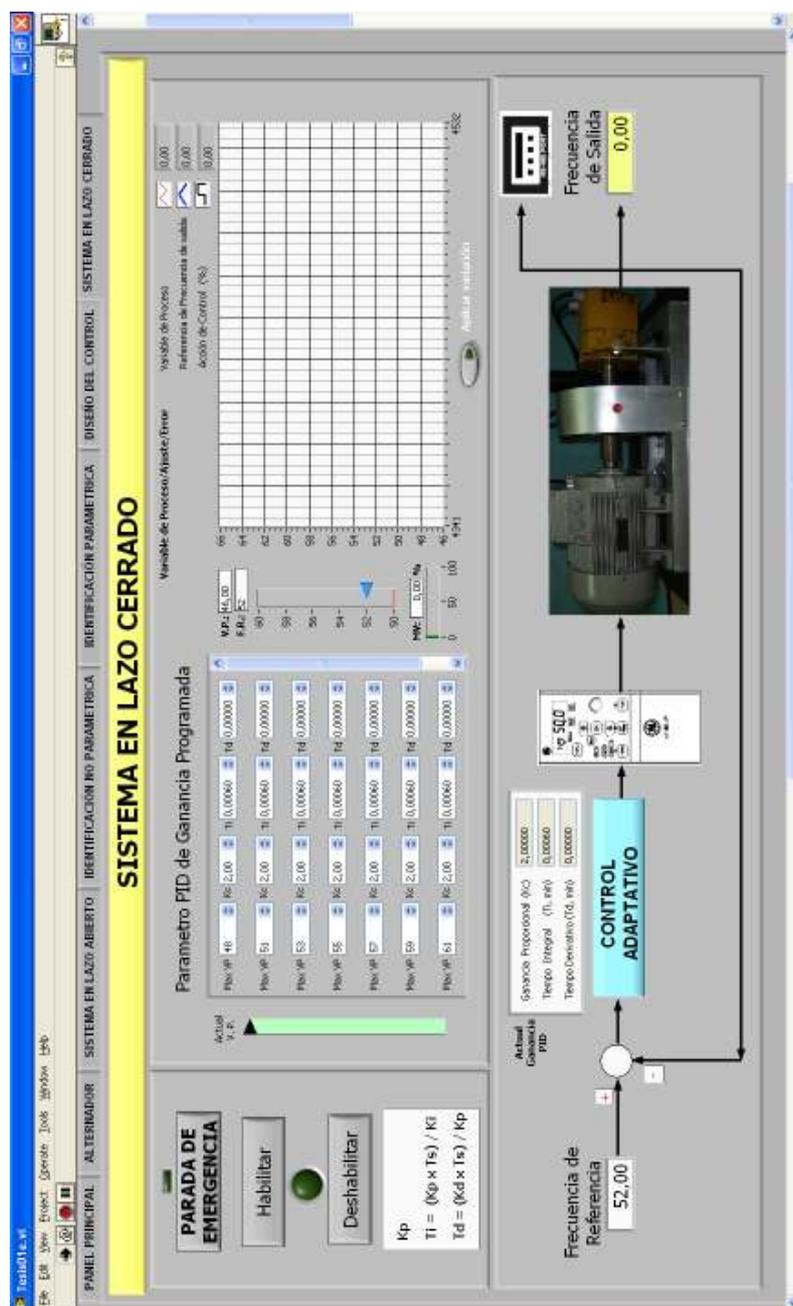


Figura 37. Pantalla de Control Adaptativo de Ganancia Programada en lazo Cerrado.

5.- RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.

Para las pruebas, primero debemos activar la planta en lazo abierto y llevar la frecuencia de salida de la Planta al punto de operación deseado, para nuestro caso se han seleccionado las frecuencias de 50 Hz, 52 Hz, 54Hz, 56Hz, 58Hz y 60 Hz. Una vez alcanzada la frecuencia de interés se excitará el sistema con ruido blanco, el cual debe causar una variación de la frecuencia de salida en 1 Hz, se procede a capturar los datos de interés, para efectuar la correspondiente identificación del sistema, para ese punto de operación.

Durante la Identificación No Paramétrica, se obtienen datos que nos ayudarán a la Identificación Paramétrica, este proceso es repetitivo hasta obtener las funciones de transferencia de cada punto de operación, que mejor representa la dinámica del sistema.

Si se desea obtener la función de transferencia para otros puntos de operación, se debe repetir el proceso. Las funciones de transferencias de los puntos de interés son:

Para 50 Hz. $G1(s)=$

$$e^{-0,06s} \frac{0,922(S + 26,556)(S + 20,749 \pm 49,647i)}{(S + 22,117)(S + 22,13 \pm 52,36i)}$$

Para 52 Hz. $G2(s)=$

$$e^{-0,06s} \frac{0,894(S + 25,582)(S + 24,938 \pm 50,542i)}{(S + 20,155)(S + 26,062 \pm 52,36i)}$$

Para 54 Hz. $G3(s)=$

$$e^{-0,06s} \frac{0,9(S + 26,16)(S + 26,952 \pm 50,794i)}{(S + 20,715)(S + 27,987 \pm 52,36i)}$$

Para 56 Hz. $G4(s)=$

$$e^{-0,06s} \frac{0,9(S + 22,51)(S + 19,735 \pm 49,92i)}{(S + 16,36)(S + 21,023 \pm 52,36i)}$$

Para 58 Hz. G5(s)=

$$e^{-0,06s} \frac{0,903(S + 29,15)(S + 33,039 \pm 51,395i)}{(S + 24,085)(S + 34,707 \pm 52,36i)}$$

Para 60 Hz. G6(s)=

$$e^{-0,06s} \frac{0,909(S + 26,847)(S + 27,926 \pm 50,873i)}{(S + 21,574)(S + 28,932 \pm 52,36i)}$$

Se deben ingresar los polos, ceros, ganancia y retardo, obtenidos en la Identificación Paramétrica, en la pantalla de control (Ver Figura 38), luego activar el interruptor, con lo que se inicia la obtención de los correspondientes Kp, Ki, Kd para cada punto de operación.

Como se puede apreciar, se deben ajustar los valores de Kp, Ki y Kd para que el sistema, se comporte de tal manera que quede dentro de los

parámetros seleccionados de sobredisparo porcentual y tiempo de asentamiento deseado.

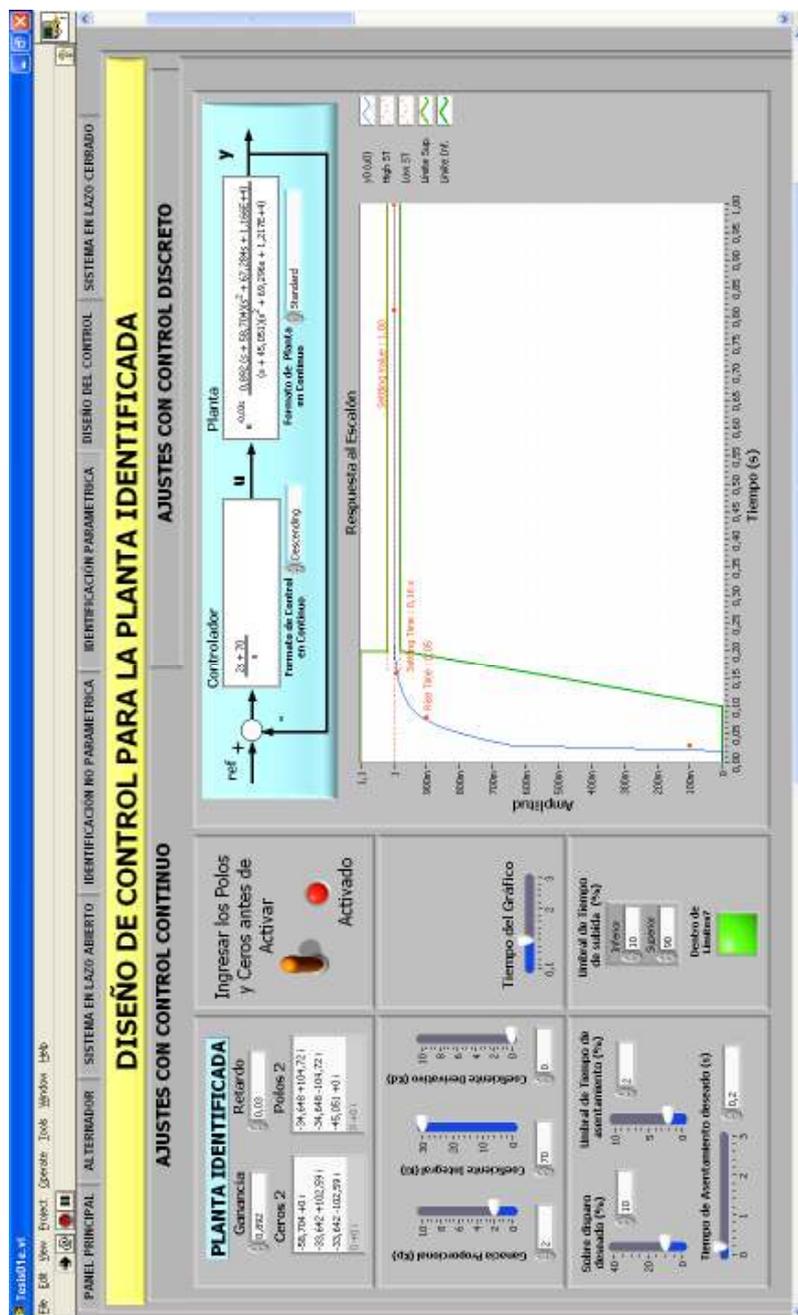


Figura 38. Pantalla de Diseño de Control en tiempo Continuo.

Los valores de las ganancias obtenidas son las siguientes:

Tabla No. 1

No.	Frecuencia	Kp.	Ki.	Kd.	Observaciones
1	50 Hz.	1,1	100	0	
2	52 Hz.	1,4	120	0	
3	54 Hz.	2	240	0	
4	56 Hz.	1,4	120	0	
5	58 Hz.	1,4	120	0	
6	60 Hz.	1,4	120	0	

Calcular las constantes de tiempo T_i y T_d para los diversos puntos de operación, según las siguientes formulas:

$$T_i = (K_p \times T_s) / K_i$$

$$T_d = (K_d \times T_s) / K_p$$

Considere que el tiempo de muestreo usado es $T_s = 0,060$ segundos.

Calcular y llenar la TABLA No. 2.

TABLA No. 2

No.	Frecuencia	Kp.	Ti.	Td.	Observaciones
1	50 Hz.	1,1	0,00066	0	
2	52 Hz.	1,4	0,00070	0	
3	54 Hz.	2	0,00050	0	
4	56 Hz.	1,4	0,00070	0	
5	58 Hz.	1,4	0,00070	0	
6	60 Hz.	1,4	0,00070	0	

Llenar la tabla de Ganancias Programadas en la pantalla de control de Ganancia Programada (Ver Figura 39), según los datos obtenidos en la tabla No. 02.

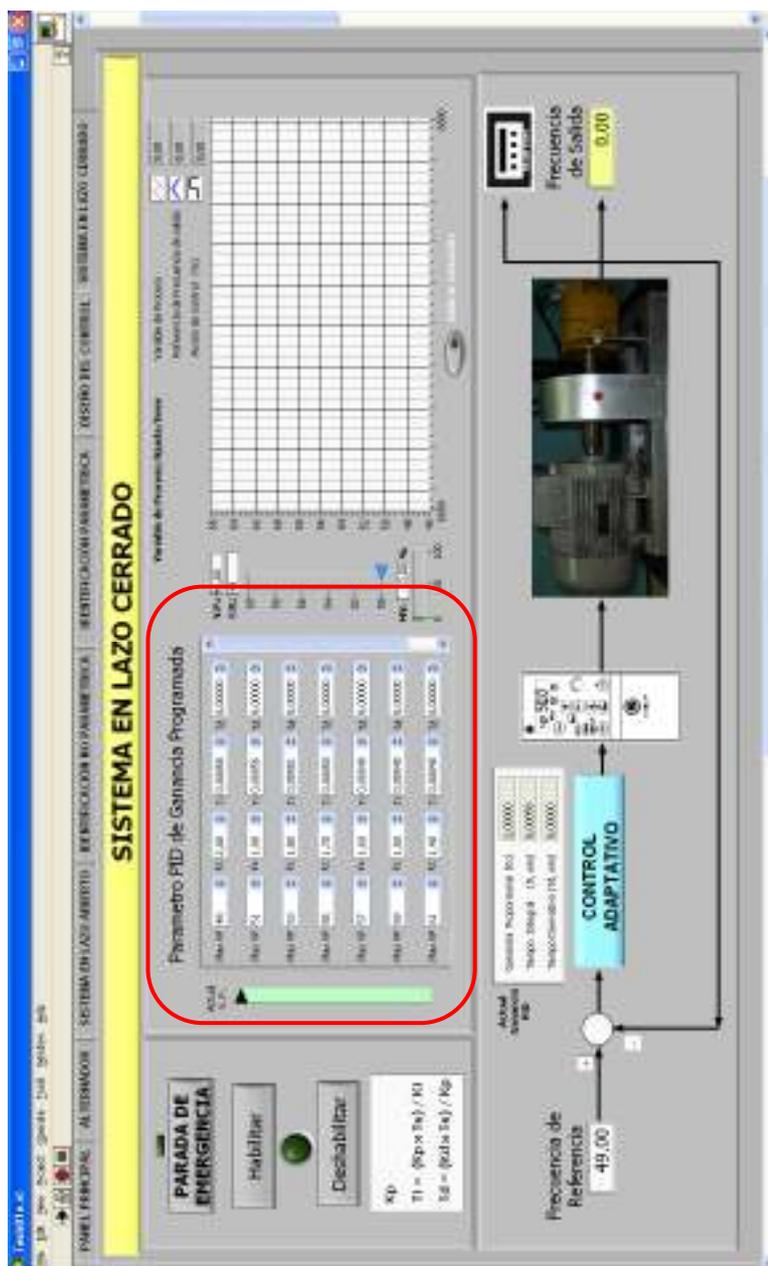


Figura 39. Pantalla de Control Adaptativo de Ganancia Programada en Lazo Cerrado.

Ingresar los datos y grabarlos, con lo que al activar el control y cerrar el lazo, el Control Adaptativo quedará listo para iniciar las pruebas (Ver Figura 40).

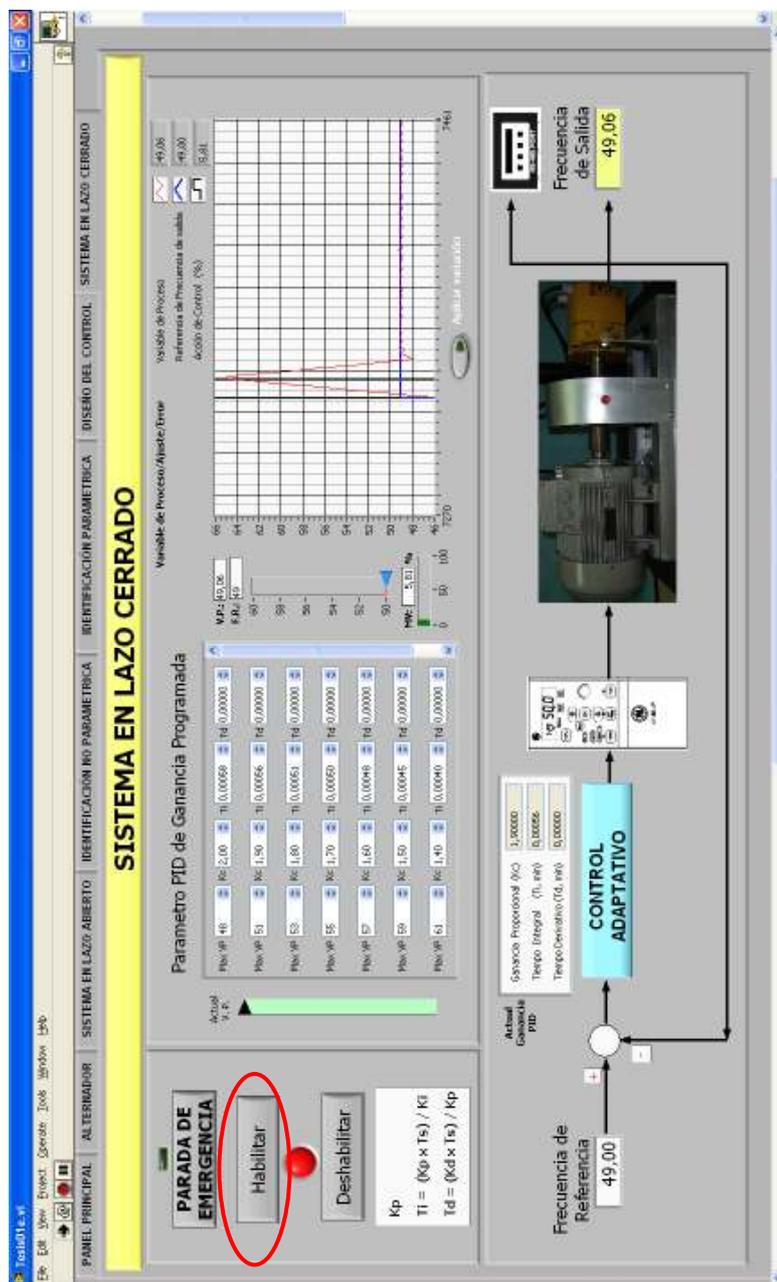


Figura 40. Interruptor de Activación Control Adaptativo de Ganancia Programada.

Ajustar la referencia a un valor entre 50 y 60 Hz en la ventana F.R. (Ver Figura 41), ahora se puede apreciar como la frecuencia de salida sigue a la referencia. En forma análoga, observar en la interfaz gráfica el comportamiento del sistema al variar dicha referencia.

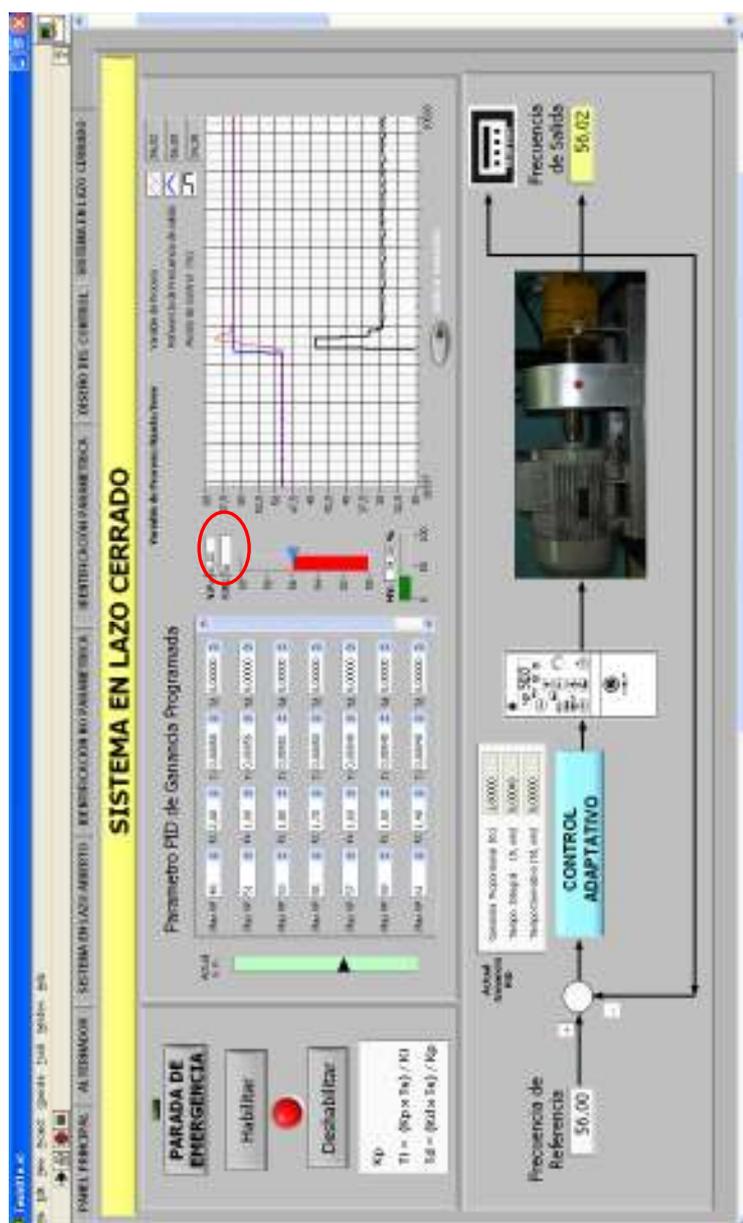


Figura 41. Ingreso de Referencia de Control Adaptativo de Ganancia Programada.

El sistema puede requerir de algunos ajustes finos, para mejorar el desempeño del Control Implementado, con lo que los ajustes finales de los K_p , T_i y T_d quedarán con los siguientes valores (Ver Tabla 3).

TABLA No. 3

No.	Frecuencia	K_p.	T_i.	T_d.	Observaciones
1	50 Hz.	1,70	0,00055	0	
2	52 Hz.	1,52	0,00054	0	
3	54 Hz.	1,48	0,00051	0	
4	56 Hz.	1,36	0,00046	0	
5	58 Hz.	1,29	0,00040	0	
6	60 Hz.	1,18	0,00039	0	

El sistema seguirá la referencia y mostrara el siguiente comportamiento (Ver Figura 42).

Con la finalidad de que las pruebas puedan ser reproducidas, por otras estudiantes y profesores que usen esta Planta , en el Anexo 6 se han elaborado cuatro laboratorios que servirán de guía para que puedan efectuar, la Identificación del sistema, el ajuste de los diversos controles PID y finalmente ajustar el Control adaptativo de Ganancia Programada.

CONCLUSIONES.

1. Un parámetro de vital importancia en la Identificación de un sistema, es el tiempo de muestreo. Se revisaron muchos textos de ingeniería pero no se encontró, una referencia del tiempo de muestro apropiado para éste tipo de sistema, por tal motivo el tiempo de muestreo de esta Planta, se lo obtuvo en forma experimental, determinándose que el tiempo de muestreo requerido para ésta Planta es de 60 milisegundos.
2. Durante la Identificación No Paramétrica y la Identificación Paramétrica, se comprobó que la mejor señal para excitar un sistema con característica No lineal similar a éste, es una señal escalonada aleatoria, con la cual se logró obtener las funciones de transferencia que representan de mejor manera la dinámica de la Planta.
3. Fueron de extraordinaria ayuda los datos obtenido a través de la pantalla de la Identificación No Paramétrica, en los cuales de una manera gráfica se observa, la respuesta del sistema ante una entrada tipo escalón y una entrada tipo impulso, obteniéndose una primera estimación del número de polos y ceros que debería tener la función de transferencia, de éste sistema.
4. Los primeros datos obtenidos en la Identificación No Paramétrica, contribuyó a reducir el modelo que se obtuvo a través de la Identificación Paramétrica,

variando el número de polos, ceros y retrasos de tiempo, hasta obtener los mejores valores de la correlación cruzada, y la predicción del error

5. Las funciones de transferencia obtenidas son de tercer orden, con un polo real y dos polos complejos conjugados, adicionalmente el sistema posee un retardo de tiempo. Con estos datos se puede proceder al diseño de cualquier estrategia de control.
6. Una vez que se obtuvieron los polos, ceros y retardos de tiempo de la función de transferencia, se procedió a sintonizar el control PID hasta obtener las ganancias K_p , K_i y K_d que generaron un sobredisparo porcentual y un tiempo de asentamiento aceptable para ésta Planta. Sin embargo debe recordarse, que éstos valores, son los primeros ajustes y que servirán de base, para lograr una óptima sintonización de la planta.
7. Se ingresarán los valores de K_p , T_i y T_d , en la tabla de Ganancia Programada para los diversos punto de operación de la Planta, cuando se activa esta técnica de control avanzado del sistema en lazo cerrado, y con la ayuda de una interfaz gráfica, se puede observar las mejoras en la respuesta de la Planta ante las variaciones de la referencia

8. Al encender la planta y activar el lazo de control, se prueba el sistema con el Control Adaptativo de Ganancia Programada, pudiéndose observar a través de la interface gráfica, el comportamiento del sistema y de la acción de control, para que la frecuencia de salida de la Planta siga a la referencia deseada.
9. El software Labview demostró ser una herramienta poderosa para el desarrollo de las pantallas de control, por ser una interfaz gráfica de fácil implementación, y además facilitó la tarea para la implementación del Control Adaptativo de Ganancia Programada propuesto.
10. Como un valor agregado de esta tesis, las pantallas gráficas para la Identificación Paramétrica, No Paramétrica y ajuste del Control, han sido desarrolladas de tal manera que puedan ser usadas con datos externos a esta planta y que permitirán la apropiada Identificación y ajuste de otras Plantas.
11. En el aprendizaje técnico además de los contenidos teóricos, es fundamental la realización de prácticas con equipos reales, dichas prácticas son muy difícil de efectuar en una planta industrial real por los costos y riesgos implícitos, razón por la cual, esta Planta de Generación de Energía contribuirá a la asimilación de los conceptos teóricos.

RECOMENDACIONES.

1. Uno de los aspectos más importante para el diseño y construcción de esta Planta, fue la seguridad de los usuarios, razón por lo cual se recomienda que proyectos similares sean de acoplamiento directo, con lo que se evita el uso de bandas, poleas ó piñones, para reducir al máximo el riesgo de accidentes.
2. Durante el proceso de construcción de la Planta, se cotizaron motores de 2 HP, 1800 RPM adicionalmente se cotizaron motores con velocidades de giro inferior y se encontró que los motores de más bajas RPM disponibles en el mercado son de 900 RPM, para revoluciones menores deben ser pedidos como una orden de producción especial, con una entrega mínima de 6 meses y con altos costos, razón por la que cual recomendamos tomar en consideración estos aspectos para reducir los costos y tiempo de construcción.
3. Se pueden usar los mismos componentes de esta planta, para implementar otros tipos de control tal como un control difuso ò red neuronal, de tal manera que los estudiantes puedan comparar el desempeño del sistema ante diversos tipos de control.
4. En ésta planta se ha dejado instalado un captador magnético de tal manera, que se pueda implementar la identificación del conjunto variador-motor,

incrementando la flexibilidad de la planta para la identificación de un nuevo sistema.

5. En el computador que controla la planta se puede programar y configurar para que el sistema, pueda ser controlado y monitoreado en forma remota, con lo cual los estudiantes puedan acceder en forma remota para las prácticas de laboratorio.

6. El variador de voltaje está configurado para conectarse a una fuente trifásica, de 230 voltios, 60 Hz, si no se dispone de la fuente trifásica en los laboratorios de la ESPOL, el equipo puede ser conectado a una fuente monofásica de 220 voltios, 60 Hz, pero debe reprogramar el variador de frecuencia. Todo el sistema esta dimensionado para que tenga el mismo rendimiento sin importar si la fuente a la que está conectado, tiene cualquiera de las configuraciones anteriormente mencionado.

ANEXOS.

Anexo No. 01. - Datos técnicos del motor eléctrico.

A seamless range of
low-voltage motors up to 1,250 kW



Motors

Answers for industry.

SIEMENS

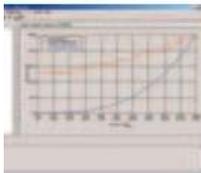
High-efficiency motors reduced energy costs and environmental protection

Energy costs account for 95% of a motor's lifecycle costs – while procurement and installation merely add up to 5%. Already today, approx. 1.5 billion Euro worldwide could be saved in energy costs every year through the application of high-efficiency motors alone. We offer motors in different efficiency classes both for the IEC and the NEMA markets.

In the NEMA market, the Ultra NEMA Premium motors guarantee maximum efficiency, while the IEC market is served with IE2 motors featuring top-of-the-line efficiency as well as a compact design:

The new 1LE1 motor generation employs the same frame for IE2 and IE1.

In addition to an excellent cost/performance-ratio and high operational reliability, the ecobalance over the entire lifecycle is a further clear advantage of our motors. Furthermore, they fit into any drive concept and cover more than 90% of all imaginable application areas worldwide. These qualities offer benefits for everyone: mechanical engineers, system operators – and the environment.



With our SinaSave software tool, we offer help for the selection of an energy-saving motor both for the IEC as well as the NEMA market:

www.siemens.com/sinasave

Type spectrum

We are one of the few motor suppliers worldwide to offer a complete portfolio of energy-saving motors:

For the IEC market

- High-efficiency energy-saving motors in the highest EU efficiency class IE2 (High Efficiency)
- Efficiency-improved energy-saving motors in EU efficiency class IE1 (Improved Efficiency)
- Motors with increased output power in IE1 and IE2

For the NEMA market

- IEC energy-saving motors in accordance with the US Federal Law EPAAct (Energy Policy Act of 1992) for 60 Hz operation with CC number
- NEMA motors with minimum legal efficiencies in accordance with the US Federal Legislation EPAAct (Energy Policy Act of 1992 – US Federal Legislation)
- NEMA motors with NEMA Premium efficiency in accordance with NEMA MG1
- NEMA motors with Ultra NEMA Premium efficiency: exceed the NEMA Premium efficiency recommended by NEMA

Advantages

- Noticeable reduction of operating costs through efficiency optimization
- Especially compact motors from the 1LE1 series. IE1 and IE2 motors in the same, short frame length
- High overload reserves in continuous operation (SF 1.15)
- Inverter-proof up to 460 V as a standard, own version available up to 690 V
- Environmental protection through CO₂ reduction
- Positive ecobalance of high-efficiency motors
- Part of Totally Integrated Automation via inverters and PROFIBUS and PROFINET
- Can be easily modified using modular mounting kits

Overview of low-voltage motors

Application	General Purpose	Severe Duty	General Purpose	Severe Duty
	Energy-saving motors according to IEC		Energy-saving motors according to NEMA	
Housing material	Aluminum	Cast iron	Aluminum/ cast iron	Cast iron
Application area	Standard	Standard, harsh ambient conditions	General purpose	Severe duty
Rated power	0.12 kW - 45 kW	0.75 kW – 1250 kW	1-20 / 1-200 HP	1-400 HP
Frame size	63M - 225	71 - 450	140-250/140-440	140-440
Rated speed	750 - 3000 rpm ⁻¹	750 - 3600 rpm ⁻¹	900 - 3600 rpm ⁻¹	900 - 3600 rpm ⁻¹
Rated torque	0.61 - 293 Nm	7 - 10300 Nm	1.5-60 lb-ft	1.5-1772 lb-ft
Rated voltage	All commonly used voltages	All commonly used voltages	208-230/460& 575 V with 60 Hz	208-230/460& 575 V with 60 Hz
Efficiency class	IE1, IE2	IE1, IE2	High Efficiency, NEMA Premium Efficiency	High Efficiency, NEMA Premium Efficiency
Degree of protection	IP55, IP56 (non-heavy-sea), IP65	IP55, IP56 (non-heavy-sea), IP65	TEFC	TEFC
Cooling method	Surface-cooled	Surface-cooled	Fan-cooled	Fan-cooled
Construction types	All common construction types	All common construction types	Common NEMA construction types	Common NEMA construction types
Temperature class	155(F) utilized acc. to 130(B)/155(F)	155(F) utilized acc. to 130(B)/155(F)	Class B @1.0 SF, Class F @1.15SF	Class B @1.0 SF, Class F @1.15SF
For inverter operation up to 460 V	Standard	Standard	No	Yes
For inverter operation up to 690 V	Special insulation	Special insulation	No	No
Approvals	CE, CCC, UL, CSA CNS14400, KEMKO, ABNT/INMETRO, PSE-Mark Japan	CE, CCC, UL, CSA CNS14400, KEMKO, ABNT/INMETRO, PSE-Mark Japan	CE, CSA, UL, ee, NOM	CE, CSA, UL, ee, NOM
Approvals for marine drives	Below deck operation: BV, DNV, GL, LR, RS	Below deck operation; BV, DNV, GL, LR, RS On-deck operation: Loher motors	No	No
Encoder	Yes	Yes	Yes	Yes
Brake	Yes	Yes	No	Yes
External fan	Yes	Yes	Yes	Yes
Typical applications	Pumps, fans, compressors, conveyor technology, ship applications with special requirements in terms of low weight and maximum efficiency	Pumps, fans, compressors, conveyor technology, ship applications, mixers, extruders in the chemical and petrochemical industry	Pumps, compressors, fans, conveyor technology, industrial applications	- Chemical and petrochemical industry - Mining industry - Printing and paper industry

Anexo No. 02.- Datos técnicos del variador de frecuencia.

AF-6 LP™ Micro Drive
AC Adjustable Frequency Drive
Guide-Form Technical
Specification



Contents

- 1.0 General Information
- 2.0 Operating Conditions
- 3.0 Standards
- 4.0 Input Power Section
- 5.0 Output Power Section
- 6.0 Drive Keypad
- 7.0 Drive Features

AF-60 LP is a trademark of the General Electric Company.

AF-60 LP Guide-Form Specification

1.0 General Information

1.1 Purpose

This specification shall establish minimum requirements for adjustable frequency drive equipment. Drives that do not meet these requirements shall not be acceptable. The adjustable frequency drive equipment shall be the AF-60 LP Micro as furnished by GE.

1.2 Driven Equipment

The Drive shall be capable of operating a NEMA design B squirrel cage induction motor with a full load current equal to or less than the continuous output current rating of the Drive. At base speed (60Hz) and below, the Drive shall operate in a constant V/Hz mode or a constant voltage extended frequency mode.

1.3 Drive Construction

The AF-60 LP Adjustable Frequency Drive shall be a sinusoidal PWM type Drive with sensor-less dynamic torque vector control (DTVC) capability. The Drive shall be provided in an IP20 enclosure at all ratings. IP21 & NEMA 1 enclosure rating Option Kits shall be available to meet Drive enclosure integrity requirements. The Drive shall be of modular construction for ease of access to control and power wiring as well as Maintenance requirements. The Drive shall consist of the following general components:

- 1.3.1 Full-Wave Diode Rectifier Bridge to convert AC supply to a fixed DC voltage
- 1.3.2 DC link capacitors
- 1.3.3 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) inverter output section
- 1.3.4 The Drive shall be microprocessor based with an LCD display to program and monitor Drive parameters.
- 1.3.5 The keypad shall be divided into four (4) functional groups: Numeric Displays, Menu Key, Navigation Keys, and Operation Keys and LED's.
- 1.3.6 Separate control and power terminal boards shall be provided.
- 1.3.7 The Drive shall provide an RS-485 serial communications port standard.
- 1.3.8 *The Drive control and power circuit boards shall be conformal coated for long-life and clean connections.*

2.0 Operating Conditions

- 2.0.1 The Drive's operating ambient temperature range shall be -10°C to 50°C.
- 2.0.2 The Drive's storage temperature shall be -25° to 65°C.
- 2.0.3 The Drive's relative humidity range shall be 5-95%, non-condensing.
- 2.0.4 The Drive shall be suitable for operation at altitudes up to 3,280 feet without de-rating.
- 2.0.5 The Drive shall be capable of sustaining a 1.0g vibration test.
- 2.0.6 *The Drive shall be capable of side-by-side installation mounting with 0 inches clearance required. The top and bottom clearance shall be 3.4 inches minimum.*

3.0 Standards

- 3.0.1 The Drive shall be UL and cUL listed and not require any external fusing. The Drive shall also be CE labeled and comply with standards 61800-3 for EMC Compliance and EN 61800-2 for Low Voltage Compliance. The Drive shall also be RoHs Compliant as well as WEEE Compliant.
- 3.0.2 The Drive shall be designed in accordance with applicable NEMA Standards.
- 3.0.3 The Drive shall be compatible with the installation requirements of interpretive Codes such as National Electric Code (NEC) and the Occupational Safety & Health Act (OSHA).
- 3.0.4 *The Drive with standard built-in AI/BI Filter shall significantly reduce Radio Frequency Interference (RFI).*

4.0 Input Power Section

- 4.0.1 The Drive shall be designed to operate at either 200-240Vac Single-Phase or Three-Phase input voltage, or 380-480Vac Three-Phase input voltage.
- 4.0.2 System frequency shall be 50 or 60 Hertz, +/- 5%
- 4.0.3 The Drive shall be able to withstand input voltage variation of +/- 10%
- 4.0.4 The Drive shall operate with an input voltage imbalance of 3.0% maximum between phases.
- 4.0.5 The displacement power factor of the Drive shall be greater than 0.98 lagging.

- 4.0.6 The true (real) power factor of the Drive shall be equal to or greater than 0.4 nominal at rated load.
- 4.0.7 The Drive shall be capable of switching the input voltage on and off a maximum of two (2) times per minute.
- 4.0.8 Drive efficiency at rated load shall be 98% or higher, depending on carrier frequency selection and load.
- 4.0.9 Line notching, transients, and harmonics on the incoming voltage supply shall not adversely affect Drive performance.
- 4.0.10 The Drive is suitable for use on circuits capable of delivering no more than 100,000 RMS symmetrical amps.

5.0 Output Power Section

- 5.0.1 The Drive shall be capable of Horsepower ratings from fractional through 10HP and Output Frequencies from 0 to 400Hz. The Drive shall also have an energy saver feature with the capability of selecting a V/Hz Automatic Control Function that will modify the V/Hz curve based on load conditions that will minimize power used.
- 5.0.2 Drive output voltage shall vary with frequency to maintain a constant V/Hz ratio up to base speed (60Hz) output. Constant or linear voltage output shall be supplied at frequencies greater than base speed (60Hz).
- 5.0.3 The output voltage of the Drive will be capable of 0-100% of the input voltage applied at the input voltage terminals.
- 5.0.4 Ramp times shall be programmable from 0.05-3,600 seconds.
- 5.0.5 The output voltage may be switched on and off an unlimited amount of times.
- 5.0.6 The Drive shall be capable of a minimum of 100% rated current in continuous operation in accordance with the requirements of NEC Table 430-150.
- 5.0.7 The Drive shall be capable of 150% overload current rating for one (1) minute.

6.0 Drive Keypad

- 6.0.1 The Drive shall be supplied with a backlit Liquid Crystal Display (LCD) Multi-Function Keypad with Speed Potentiometer. The Keypad shall be capable of programming, monitoring, and controlling the Drive.
- 6.0.2 *The Drive shall have a Quick Menu feature, that allows for quick access to the most commonly modified Drive Parameters for quick and easy setup.*

- 6.0.3 The Drive LCD Keypad Display shall have the following units available for display functions: Hz, A, V, kW, HP, %, s, or RPM.
- 6.0.4 The Drive LCD Keypad Display shall have a Motor Direction Display that will show either clockwise or counter-clockwise motor direction.
- 6.0.5 The Drive shall be capable of being operated in “hand” mode via the keypad to allow for local control of the motor at the Drive.
- 6.0.6 The Drive Keypad shall have three (3) Indication LED’s as follows:
 - 6.0.6.1 Green – The Drive is “on”
 - 6.0.6.2 Yellow – The Drive has an alarm “warning”
 - 6.0.6.3 Red – The Drive has an “alarm”
- 6.0.7 The Drive shall display operating data, fault information, and programming parameters.
- 6.0.8 The Drive LCD Keypad shall be remote mountable by using an option kit which will allow for mounting the LCD Keypad up to 10’ from the Drive.
- 6.0.9 *The Drive LCD Keypad shall be capable of copying the parameter set from one AF-6 LP Micro Drive to another AF-6 LP Micro Drive.*

7.0 Drive Features

- 7.0.1 The Drive shall be capable of remote mounting with simple wiring connections or via an RS-485 serial communications port.
- 7.0.2 Upon a fault condition, the Drive shall display drive parameters captured at the time the fault occurred to aid in trouble-shooting of the fault. The Drive will store the last ten (10) fault trips in a Fault Log Parameter.
- 7.0.3 The Drive shall operate as an open-loop system requiring no motor fdbk device.
- 7.0.4 The Drive shall accept and follow a selectable external frequency reference of 0-10Vdc, 0-20ma, or 4-20mA.
- 7.0.5 The Drive will also follow an internal frequency set-point off the up and down arrows on the LCD Keypad, optional LCD Keypad Speed Potentiometer, parameter preset speeds, or serial communications speed set-point via RS-485.
- 7.0.6 The Drive shall maintain the output frequency to within 0.2% of reference when the reference is analog, and to within 0.01% of reference when the reference is digital (keypad, contact closure, or serial communications)

- 7.0.7 The Drive shall maintain set-point frequency regardless of load fluctuations.
- 7.0.8 The Drive shall be able to operate in three (3) modes: Hand, Off, or Auto.
- 7.0.9 The Drive shall be password protected to protect against unintended change of sensitive parameters.

Anexo No. 03. - Datos técnicos de la tarjeta de adquisición de datos.

NI USB-6008

14-Bit, 48 kS/s Low-Cost Multifunction DAQ

- 8 analog inputs (14-bit, 48 kS/s)
- 2 analog outputs (12-bit, 150 S/s); 12 digital I/O; 32-bit counter
- Bus-powered for high mobility; built-in signal connectivity
- OEM version available
- Compatible with LabVIEW, LabWindows/CVI, and Measurement Studio for Visual Studio .NET
- NI-DAQmx driver software and NI LabVIEW SignalExpress LE interactive data-logging software



Specifications Summary

General

Product Name	USB-6009
Product Family	Multifunction Data Acquisition
Form Factor	USB
Operating System/Target	Windows , Linux , Mac OS , Pocket PC
DAQ Product Family	B Series
Measurement Type	Voltage
RoHS Compliant	Yes

Analog Input

Channels	8 , 4
Single-Ended Channels	8
Differential Channels	4
Resolution	14 bits
Sample Rate	48 kS/s
Throughput	48 kS/s
Max Voltage	10 V
Maximum Voltage Range	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	138 mV
Minimum Voltage Range	-1 V , 1 V
Minimum Voltage Range Accuracy	37.5 mV
Number of Ranges	8
Simultaneous Sampling	No
On-Board Memory	512 B
Analog Output	
Channels	2
Resolution	12 bits
Max Voltage	5 V
Maximum Voltage Range	0 V , 5 V
Maximum Voltage Range Accuracy	7 mV
Minimum Voltage Range	0 V , 5 V
Minimum Voltage Range Accuracy	7 mV
Update Rate	150 S/s

Current Drive Single	5 mA
Current Drive All	10 mA
Digital I/O	
Bidirectional Channels	12
Input-Only Channels	0
Output-Only Channels	0
Number of Channels	12 , 0 , 0
Timing	Software
Logic Levels	TTL
Input Current Flow	Sinking , Sourcing
Output Current Flow	Sinking , Sourcing
Programmable Input Filters	No
Supports Programmable Power-Up States?	No
Current Drive Single	8.5 mA
Current Drive All	102 mA
Watchdog Timer	No
Supports Handshaking I/O?	No
Supports Pattern I/O?	No
Maximum Input Range	0 V , 5 V
Maximum Output Range	0 V , 5 V
Counter/Timers	
Counters	1
Buffered Operations	No

Debouncing/Glitch Removal	No
GPS Synchronization	No
Maximum Range	0 V , 5 V
Max Source Frequency	5 MHz
Minimum Input Pulse Width	100 ns
Pulse Generation	No
Resolution	32 bits
Timebase Stability	50 ppm
Logic Levels	TTL
Physical Specifications	
Length	8.51 cm
Width	8.18 cm
Height	2.31 cm
I/O Connector	Screw terminals

Related Information

- NI USB Data Acquisition for OEM
- Download NI Data Acquisition Drivers
- NI LabVIEW SignalExpress Interactive Data-Logging Software

© 2010 National Instruments Corporation. All rights reserved. For information regarding NI trademarks, see ni.com/trademarks. Other product and company names are trademarks or trade names of their respective companies. Except as expressly set forth to the contrary below, use of this content is subject to [the terms of use for ni.com](#).

National Instruments permits you to use and reproduce the content of this model

page, in whole or in part; provided, however, that (a) in no event may you (i) modify or otherwise alter the pricing or technical specifications contained herein, (ii) delete, modify, or otherwise alter any of the proprietary notices contained herein, (iii) include any National Instruments logos on any reproduction, or (iv) imply in any manner affiliation by NI with, or sponsorship or endorsement by NI of, you or your products or services or that the reproduction is an official NI document; and (b) you include the following notice in each such reproduction:

“This document/work includes copyrighted content of National Instruments. This content is provided “AS IS” and may contain out-of-date, incomplete, or otherwise inaccurate information. For more detailed product and pricing information, please visit *ni.com*.”

<http://www.ni.com/niweek/?metc=mtxrhy>

Anexo No. 04.- Datos técnicos del Medidor de Energía.



The 3710 ACM is an economical, panel mounted, 3-phase digital power monitoring instrument. Well established and successful, the 3710 ACM offers high accuracy, reliability and exceptional ruggedness. It is an affordable solution for power utilities and industrial or commercial power distribution systems. The 3710 ACM can be used stand alone or as one element in a large energy management network. The 3710 ACM is an economical, panel mounted, 3-phase digital power monitoring instrument. Well established and successful, the 3710 ACM offers high accuracy, reliability and exceptional ruggedness. It is an affordable solution for power utilities and industrial or commercial power distribution systems. The 3710 ACM can be used stand alone or as one element in a large energy management network.

Cost Effective

- Replaces dozens of separate meters
- Simple installation

Measurements

- True RMS voltage, current & power

Data Logging

- Waveform Capture
- Scheduled or event-driven logging
- Min/Max logging
- Sequence of events logging

Extensive I/O

- digital/counter inputs
- 3 digital relay outputs

Powerful Setpoint Control System

- Setpoint on any parameter or condition

Communications

- Supports Modbus, DNP and PLC/AB

Front Panel Display

The front panel features an easy-to-read, 20-character vacuum fluorescent display. Voltage, current and power functions can all be displayed together for the selected phase. Voltage or current readings can be displayed for all three phases concurrently.

The 3710 ACM may also be ordered with no front panel display for use as a digital power transducer.

- Four sealed membrane switches for parameter selection and programming
- Select voltage and current readings using the PHASE key
- Common power functions are available using the FUNCTION key
- Display the maximum and minimum values for each measured parameter using the MAX/MIN keys
- Programming and control is password protected

Extensive I/O

Use the inputs to monitor utility KYZ initiators, device cycles, running hours, etc. Outputs can be used for equipment control, alarms, etc.

Status Inputs

- Four optically isolated, digital (status) inputs can monitor status, count pulses, or any other external dry contact

Relays

- 3 on-board relays controlled automatically by the internal setpoints or manually via a communications port
- Programmable for kWh, kVARh or kVAh output pulsing
- Form C mechanical relays rated at 10 A (AC or DC); or single-pole, single-throw solid state relays rated at 1 A (AC only)

Auxiliary Output

- Auxiliary analog current output provides 0-20mA or 4-20 mA proportional to any measured parameter

Control

The 3710 ACM setpoint system provides intelligent logging and control functions.

Programmable Setpoint Control

Setpoints are defined by independent high and low trigger limits (for operate/release hysteresis), and time delays on both operate/ release for the resulting function. Multiple setpoints can be channelled to a single relay ("OR" function) for multi-level setpoint protection functions. All setpoint activity is recorded automatically in the on-board Event Log.

- 17 setpoints, one second (typ.) response time
- Any setpoint condition can be set to control relays

Metering

The 3710 ACM provides high accuracy true RMS measurements of voltage, current, power and energy readings, as well as minima, maxima, and status parameters. All parameters are quickly accessible via the front panel display or through the communications port. Voltage, current, power and energy readings are sensitive to beyond the 50th harmonic. Four-quadrant readings measure bidirectional (import/ export) energy flow, useful in any cogeneration application.

Instantaneous

Voltage (I-I/n), per phase & average

Current, per phase & average

Neutral Current

Real, Reactive & Apparent Power, total (per phase available via communications)

Power Factor, total

Frequency

Auxiliary Voltage

Phase Reversal

Energy

Real & reactive, imported, exported, total and net kWh & kVARh. Apparent energy, total kVAh.

Demand

Sliding Window Demand calculated for average current and total real power, or for total apparent power and total real power.

Minimums and Maximums

Recorded for all base measurements & Sliding Window Demand values.

Logging & Recording

The 3710 ACM provides three types of onboard data logging: events, min/max levels, and snapshot readings are all automatically time-stamped and recorded in non-volatile memory. There is also a waveform capture feature. All logging functions are continuous and concurrent.

Using Power Measurement.s software you can display all logged data. The software will automatically archive to disk all logged data retrieved from each device. The data can be converted to file formats compatible with other software. Min/max values can also be viewed via the front panel.

Historical Logging

Produce daily/weekly/monthly load profile graphs for important readings.

- Log up to 12 channels of time-stamped data: V avg, I avg, kW total, kVAR total, kW total Demand, I avg Demand, PF, Vaux, Frequency, kWh import, kWh export, and kVARh total
- Trigger at specified time intervals, 1 second to 400 days for preset & programmable logs

Minimum/Maximum Logging

Records extreme values for system operations analysis, troubleshooting and problem tracking.

- Records extreme values for all measured parameters
- Minima/maxima for each parameter are logged independently with a date and time stamp @ 1 second resolution

Event Logging & Alarming

Records all setpoint/alarm conditions, relay operations, setup changes, and selfdiagnostic events.

- The 3710 ACM stores up to 50 date & time stamped records
- Time stamp resolution to 1 second
- Sequence-of-event recording

Communications

The 3710 ACM can be integrated within energy monitoring networks and supports a variety of protocols. Links between remote sites can use RS-485 or modems with telephone lines (dedicated or dial-up), fiber optic and/or radio links.

Optional Communications Port

- Single optically isolated, transient protected port
- Data rates up to 19,200 bps.
- RS-232 or RS-485
- PML, A-B DF1, Modicon Modbus RTU or Alarm Dialer protocols

The Alarm Dialer (AD) communication protocol enables the 3710 ACM to automatically contact a master display station on the occurrence of an alarm condition.

Input & Output Ratings

Voltage Inputs

- Basic: 120 line-to-neutral / 208 line-to-line nominal full scale input
- 277 Option: 277 VAC nominal full scale input
- 347 Option: 347 VAC nominal full scale input
- All options: Overload withstand: 1500 VAC continuous, 2500 VAC for 1 second. Input impedance for all options: 2 MW

Current Inputs

- Basic: 5.0 Amps AC nominal full scale input
- 1AMP Option: 1.0 Amp AC nominal full scale
- All options: Overload withstand 15 Amps continuous, 300 Amps for 1 second. Input impedance: 0.002W
- Burden: 0.05 VA Aux. Voltage Input
- VAC/VDC nominal full scale input (1.25 VAC /VDC max.) Overload withstand: 120 VAC/ VDC continuous, 1000 VAC/VDC for 1 second.
- Input impedance: 10 kW

Aux. Current Output

- 0 to 20 mA into max. 250W load. Accuracy: 2%

Control Relays

- Basic: Form C dry contact electromechanical relays, max. 277 VAC or 30 VDC @ 10 Amp resistive
- SSR Option: SPST solid state relays, 24 to 280 VAC @ 1 Amp AC resistive (AC operation only)

Status Inputs

- Basic: external-excited, S1, S2, S3, S4 - >20 VAC/VDC = active, <6 VAC/VDC = inactive
- Input impedance: 49.2 kW Overload withstand: 1500 V continuous, 2500 V for 1 sec.
- SES Option: self-excited +30 VDC differentialSCOM output to S1, S2, S3, or S4 input
- All Options: Minimum Pulse Width: 40 msec.

Power Supply

- Basic: 85 to 132 VAC / 47 to 440 Hz or 110 to 170 VDC @ 0.2 Amps

- P24/48 Option: 20 to 60 VDC @ 10W
- P240 Option: 85 to 264 VAC / 47 to 440 Hz or 110 to 340 VDC / 0.2 A

Environmental Conditions

Operating Temp: 0oC to 50oC (32oF to 122oF) ambient air

(XTEMP Option): -20oC to +70oC (-4oF to +158oF)

Storage Temp: -30oC to +70oC (-22oF to +158oF)

Humidity: 5 to 95 %, non-condensing

TABLA DE REGISTROS

REGISTRO	TIPO	DIRECCION	UNIDAD
40002	RW	Year year	1900
40003	RW	Month	(1-12)
40004	RW	Day	(1-31)
40005	RW	Hour	(0-23)
40006	RW	Minute	(0-59)
40007	RW	Second	(0-59)
40008	RW	UNIX	Time seconds
40011	RO	Van	V rms
40012	RO	Vbn	V rms
40013	RO	Vcn	V rms
40014	RO	Vln average	V rms
40015	RO	Vab	V rms
40016	RO	Vbc	V rms
40017	RO	Vca	V rms
40018	RO	Vll average	V rms
40020	RO	Vaux	V rms
40021	RO	Ia	A rms
40022	RO	Ib	A rms
40023	RO	Ic	A rms
40024	RO	I average	A rms
40026	RO	Neutral current (I4)	A rms
40028	RO	Voltage imbalance	%
40029	RO	Current imbalance	%
40031	RO	kW Phase A	kW rms
40032	RO	kW Phase B	kW rms
40033	RO	kW Phase C	kW rms
40034	RO	kW Total	kW rms
40035	RO	kVAR Phase A	kVAR rms

40036	RO	kVAR Phase B	kVAR rms
40037	RO	kVAR Phase C	kVAR rms
40038	RO	kVAR Total	kVAR rms
40039	RO	Power Factor Phase A	%
40040	RO	Power Factor Phase B	%
40041	RO	Power Factor Phase C	%
40042	RO	Power Factor Total	%
40043	RO	kVA Phase A	kVA
40044	RO	kVA Phase B	kVA
40045	RO	kVA Phase C	kVA
40046	RO	kVA Total	kVA
40048	RO	Frequency on Va	0.01 Hz
40049	RO	Phase Reversal Logical	
40050	RO	Real time polarity Bit mapped	
40051	RO	kWh Import kWh	
40052	RO	M/GWh Import	M/GWh
40053	RO	kWh Export	kWh
40054	RO	M/GWh Export	M/GWh
40055	RO	kWh Total	kWh
40056	RO	M/GWh Total	M/GWh
40057	RO	kWh Net	kWh
40058	RO	M/GWh Net	M/GWh
40061	RO	kVARh Import	kVARh
40062	RO	M/GVARh Import	M/GVARh
40063	RO	kVARh Export	kVARh
40064	RO	M/GVARh Export	M/GVARh
40065	RO	kVARh Total	kVARh
40066	RO	M/GVARh Total	M/GVARh
40067	RO	kVARh Net	kVARh
40068	RO	M/GVARh Net	M/GVARh
40071	RO	kVAh Import	kVAh
40072	RO	M/GVAh Import	M/GVAh
40073	RO	kVAh Export	kVAh
40074	RO	M/GVAh Export	M/GVAh
40075	RO	kVAh Total	kVAh
40076	RO	M/GVAh Total	M/GVAh
40077	RO	kVAh Net	kVAh
40078	RO	M/GVAh Net	M/GVAh

Worldwide Headquarters

Power Measurement Ltd. 2195 Keating Cross Road,
 Saanichton, British Columbia, Canada V8M 2A5
 Tel: 1-250-652-7100 Fax: 1-250-652-0411
 Web: www.pml.com Email: sales@pml.com

Anexo No. 05.- Datos técnicos del Convertidor de Protocolo.

Model 485SD9TB Port-Powered RS-485 Converter

The 485SD9TB is a port-powered two-channel RS-232 to RS-485 converter. It converts the TD and RD RS-232 lines to balanced half-duplex RS-485 signals. The unit is powered from the RS-232 data and handshake lines whether the lines are high or low. An external power supply can be connected to two terminals on the RS-485 connector if no handshake lines are available. The 485SD9TB has a DB-9 female connector on the RS-232 side and a terminal block connector on the RS-485 side.

RS-232 Side:

Connector: DB-9 Female.

Signals: Passes through pins 3 (TD) and 2 (RD).

Pins 7 (RTS) and 8 (CTS) are tied together.

Pins 4 (DTR), 6 (DSR), and 1 (CD) are tied together.

RS-485 Side:

Connector: Terminal Block

Signals: Half-duplex two-wire operation only.

Automatic control circuit enables driver only when transmitting.

Receiver is disabled when transmitting to prevent echo back to RS-232 device.

Can transmit up to 4000 feet at 115.2k baud.

Power Requirements

No external power required if two RS-232 output handshake lines are available.

External 12VDC can be applied to pins on the RS-485 side between terminals +12VDC and GND if handshake lines are not available.

35mA current draw maximum under normal operation when externally powered.

NOTE: When using an external supply, the supply should be connected only to specifically labeled power inputs (power jack, terminal block, etc.). Connecting an external power supply to the handshake lines may damage the unit. Contact technical support for more information on connecting an external power supply to the handshake lines.

Dimensions: 3.50 x 1.34 x .67 in (8.9 x 3.4 x 1.7 cm)

Although the 485SD9TB uses handshake lines to power the converter, no handshaking is required to control the RS-485 driver. The RS-485 driver is automatically enabled during each spacing state on the RS-232 side. During the

marking or idle state, the RS-485 driver is disabled and the data lines are held in the marking state by the 4.7K ohm pull-up and pull-down resistors. The value of these resistors may need to be changed to a different value when termination is used in order to maintain the proper DC bias during the idle state. See B&B Electronics' RS-422/RS-485

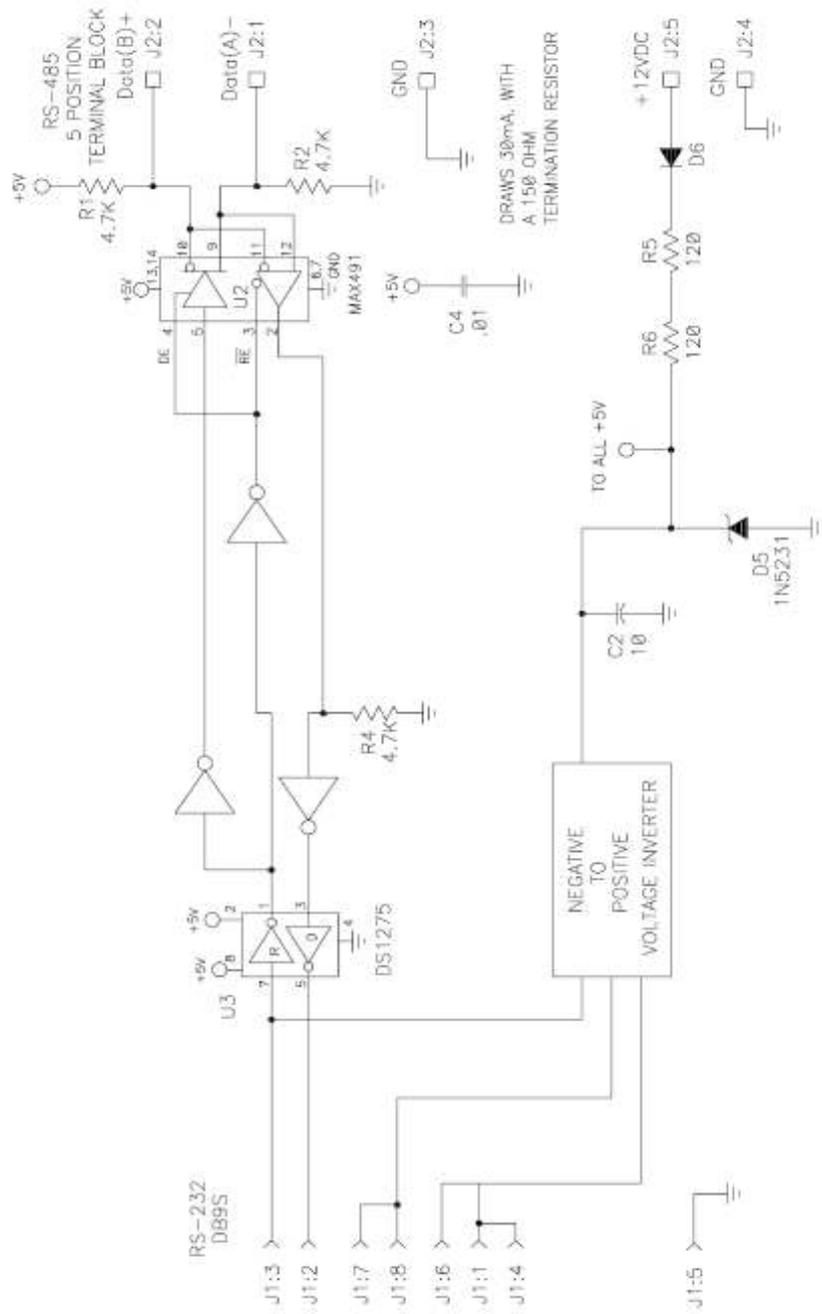
Application Note for more information on termination and DC biasing of an RS-485 network. The 485SD9TB has an internal connection to prevent data transmitted from the RS-232 port from being echoed back to the RS-232 port. The 485SD9TB is used as a two wire (half duplex) RS-485 converter.



International Headquarters:

707 Dayton Road P.O. Box 1040 Ottawa, IL 61350 USA
815-433-5100 Fax 433-5104 www.bb-elec.com orders@bb-elec.com support@bb-elec.com

Westlink Commercial Park Oranmore Co. Galway Ireland
+353 91 792444 Fax +353 91 792445 www.bb-europe.com orders@bb-elec.com support@bb-europe.com



Anexo No. 06.- LABORATORIOS.

**Laboratorio No. 01.- Identificación de Sistemas por el Método No
Paramétrico.**

**Laboratorio No. 02.- Identificación de Sistemas por el Método
Paramétrico.**

Laboratorio No. 03.- Diseño de Control para la Planta Identificada.

**Laboratorio No. 04.- Programación del Control Adaptativo de Ganancia
Programada.**

Laboratorio No. 01.- Identificación de Sistemas por el Método No

Paramétrico.

Objetivo	Capturar datos para efectuar la Identificación de un Sistema, mediante el Método No Paramétrico.
Tareas	<ul style="list-style-type: none">• Arrancar la planta en lazo abierto y llevarla cerca, de la frecuencia de operación deseada.• Habilitar el control para llevar a la planta al punto de operación deseado.• Aplicar ruido blanco al sistema e iniciar la captura de datos.• Interpretar los gráficos obtenidos en la Identificación No Paramétrica.
Herramientas	Pantallas de Labview 8.6 desarrolladas para control en lazo abierto e Identificación de Sistemas, por el Método No Paramétrico.
Seguridad	Se recomienda extremar las precauciones de seguridad, a partir de este punto, se podrán en movimiento partes mecánicas que podrían causar lesiones serias ó la muerte.

DESARROLLO

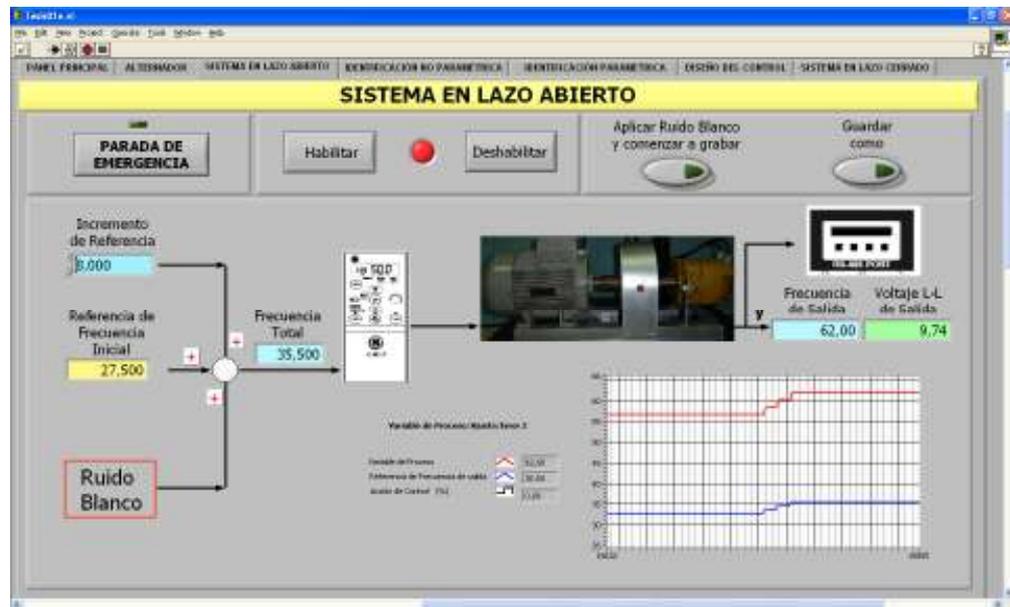
1. Energizar la Planta con una fuente de energía trifásica, 230 voltios, 60 Hz, y cerrar los disyuntores de protección principal que están dentro del tablero de control.



2. Poner el variador de frecuencia en automático, a partir de este punto el equipo puede ser arrancado desde el computador sin previo aviso, por lo que se recomienda tener las precauciones del caso.



3. Arrancar desde el computador el archivo Tesis01 que ha sido desarrollado para el control de la Planta, con el software Labview 8.6.



4. Seleccionar la pestaña PANEL PRINCIPAL y pulsar "RUN"



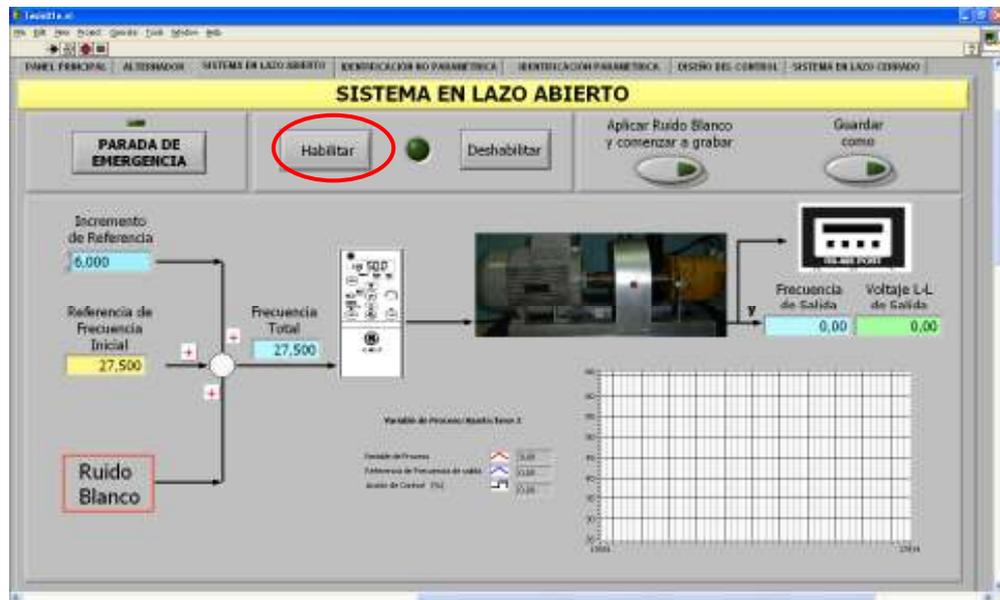
5. Arrancar la planta accionando el Interruptor de ARRANQUE REMOTO. Desde esta pantalla se monitorearán varios parámetros del variador de frecuencia.



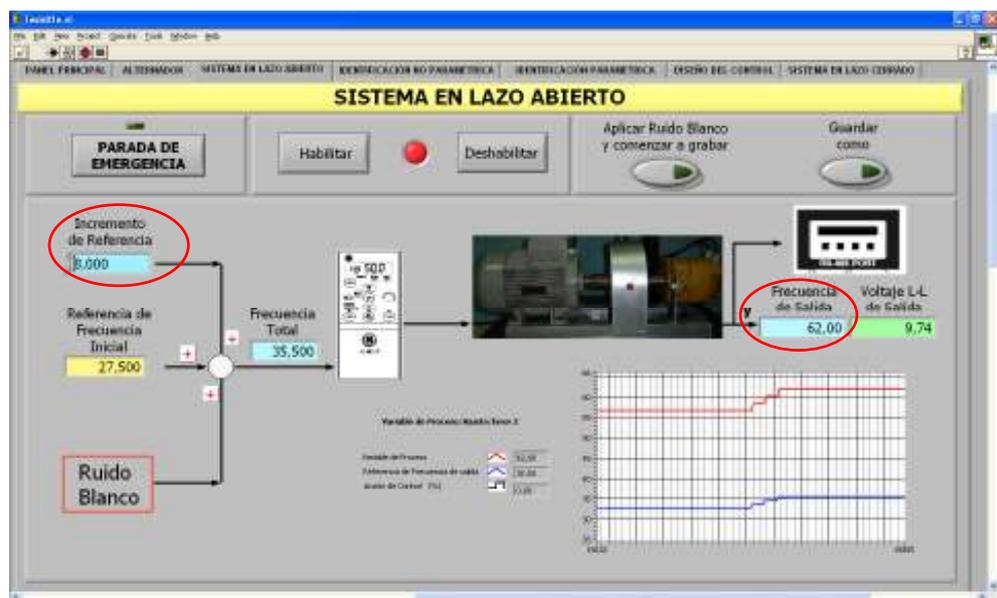
6. Al seleccionar la pestaña ALTERNADOR, se puede monitorear los parámetros del generador.



7. Seleccionar la pestaña SISTEMA EN LAZO ABIERTO, para activar esta pantalla pulsar el botón Habilitar.



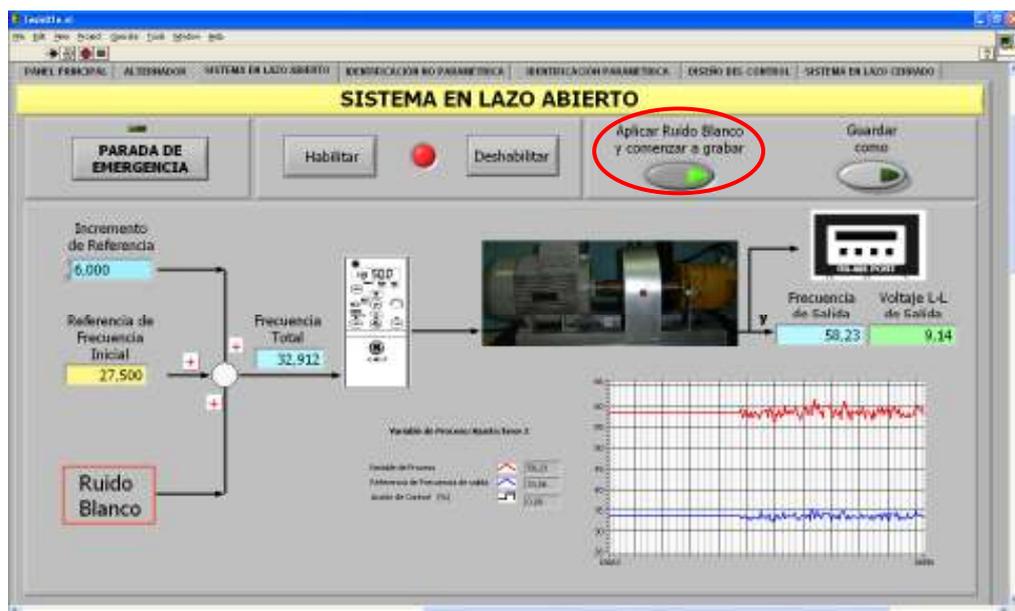
8. Incrementar la referencia hasta obtener la frecuencia de salida deseada de la Planta.



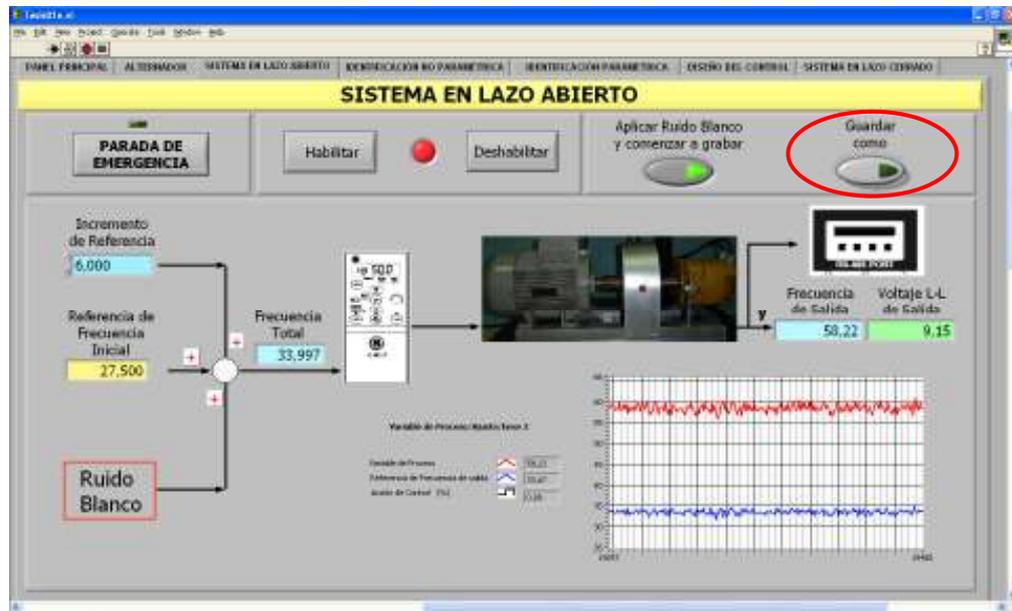
Recuerde los puntos de interés para este sistema, están ubicados a 50, 52, 54, 56, 58 y 60 Hz. Finalmente solo se seleccionarán 6 Funciones de Transferencia, que representaran el rango de frecuencia de interés, que se requiere controlar en este sistema.

Al efectuar la Identificación en un punto, por ejemplo 56 Hz y puesto que el sistema será excitado para generar variaciones de ± 1 Hz, la Función de Transferencia que se obtendrá, servirá para representar la dinámica del sistema dentro del rango 56Hz ± 1 Hz.

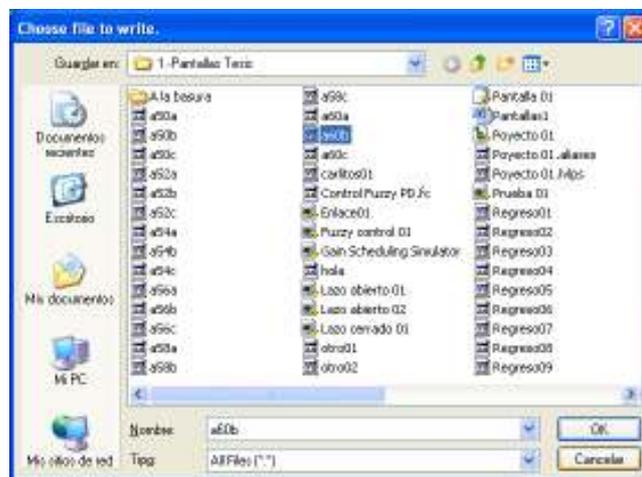
9. En este momento se ha fijado como punto de operación de la Planta 60 Hz, si se desea otro punto de operación variar la referencia. A partir de este punto podemos iniciar el proceso de excitación de la entrada con ruido blanco al mismo tiempo, se comenzará a guardar datos para la Identificación.



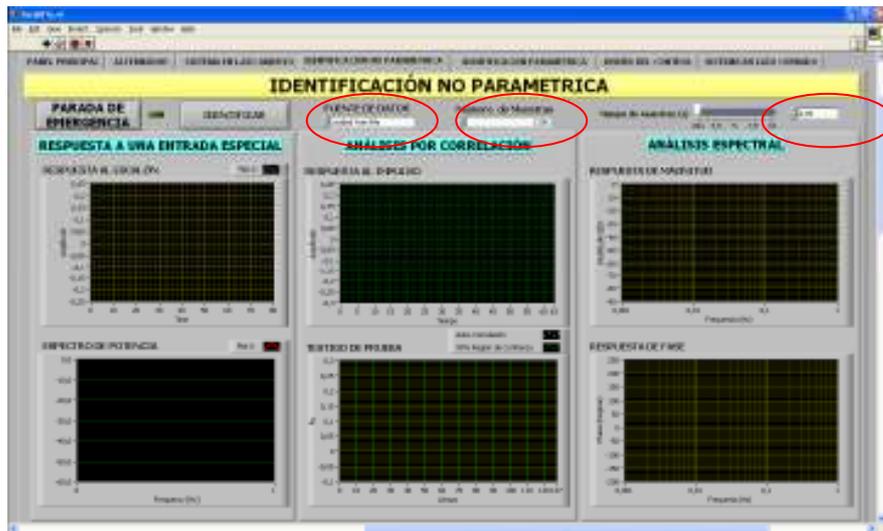
10. Después de 2 minutos, guardar los datos tomados para la Identificación.



11. Aparecerá la siguiente pantalla, donde se debe asignar un nombre y guardar los datos registrados.



12. La Planta puede ser parada, ya que no se requiere por ahora que esté operando. El siguiente paso es seleccionar la pestaña de la Identificación No Paramétrica.

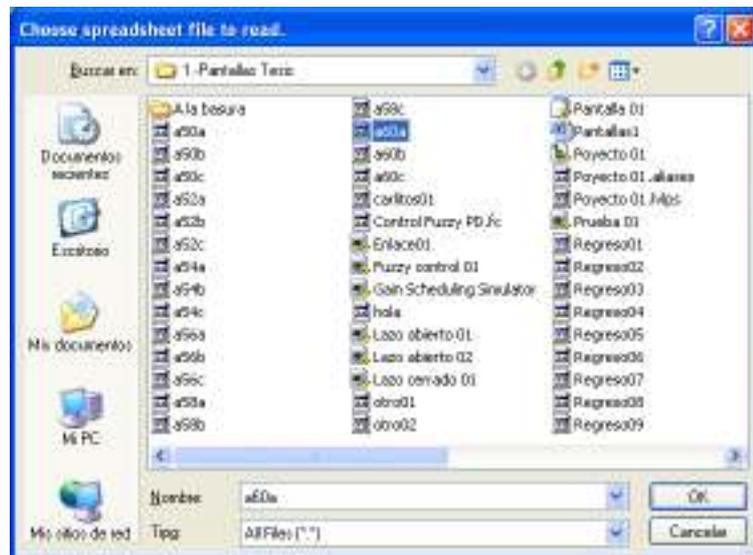


Debemos seleccionar en la Fuente de datos “Load from file”, además se debe indicar el número de muestras estimadas, considerando que el programa removi6 la media y las tendencias de las muestras. Tambi6n debe tenerse en consideraci6n que el tiempo de muestreo es de 60 milisegundos.

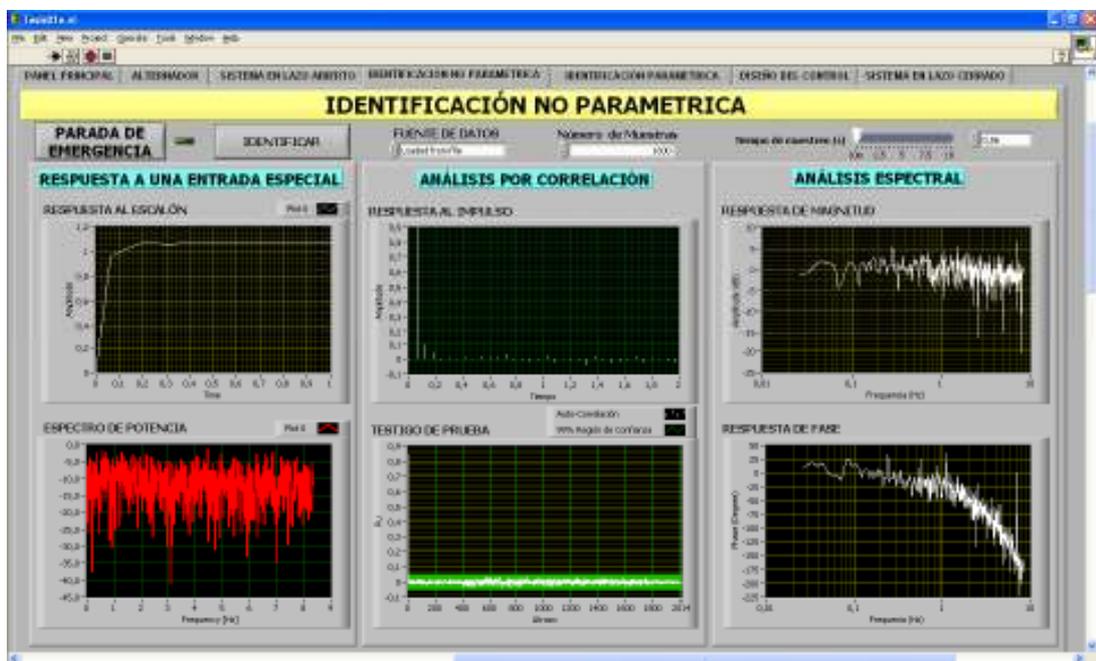
13. Una vez ajustados estos par6metros, pulsar el bot6n Identificar, la siguiente ventana aparecer6, seleccionar el tipo de archivo por “All Files(*,*)”



14. Aparecerá la siguiente pantalla, con todos los archivos con los datos grabados, para este ejemplo se tomarán, los datos a 60 Hz y se pulsara OK.



15. Se obtendrán las siguientes respuestas del Sistema.



En base a los gráficos obtenidos indicar:

PARA LA RESPUESTA A UNA ENTRADA ESPECIAL

- a. ¿Cuál es el orden del modelo, que representaría este sistema ante la entrada tipo escalón ?.

- b. El sistema es:

Subamortiguado _____
Críticamente amortiguado _____
Sobreamortiguado _____

- c. ¿Cuál es la ganancia en estado estacionario?.

- d. ¿En qué tiempo aproximadamente el sistema alcanza el valor nominal?.

- e. ¿Qué nos indica el espectro de potencia de la señal de entrada?.

ANALISIS DE CORRELACION

- f. ¿Cuál es el comportamiento del sistema ante la señal impulso aplicada?.

- g. ¿Hay algún retardo de tiempo?.

- h. Con el nivel de autocorrelación que se obtuvo es suficiente, para capturar la dinámica del sistema?.

ANALISIS ESPECTRAL

- i. En base al gráfico de magnitud y fase de este sistema, calcule el margen de ganancia y margen de fase.

Laboratorio No. 02.- Identificación de Sistemas por el Método Paramétrico.

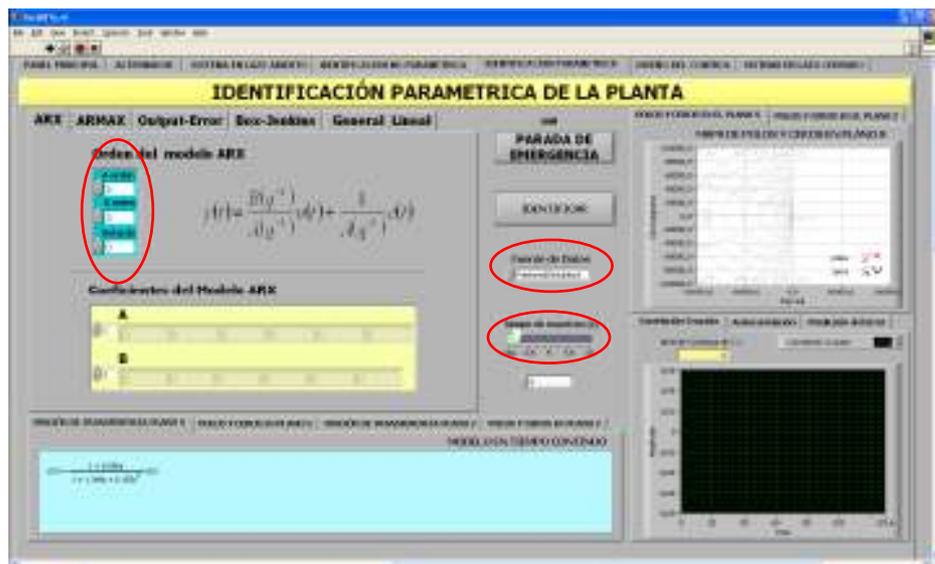
Objetivo	Efectuar la Identificación de un Sistema, mediante el Método Paramétrico, usando los modelos ARX, ARMAX, Output Error. Box Jenkins ó General Lineal.
Tareas	<ul style="list-style-type: none">• Efectuar la Identificación de la Planta usando los diversos modelos, variando el número de polos y ceros de los polinomios característicos, tomando como base la información obtenida en la Identificación No Paramétrica.• Analizar la Autocorrelación, Correlación Cruzada y el Error obtenido con las diversas Identificaciones.• Escoger la función de transferencia que mejor represente el sistema.
Herramientas	Pantallas de Labview 8.6 desarrolladas para la Identificación Paramétrica.
Literatura	Departamento de Automática y Computación. ISPJAE. Identificación de Sistemas por Msc. Aristides Reyes Bacardí.

DESARROLLO

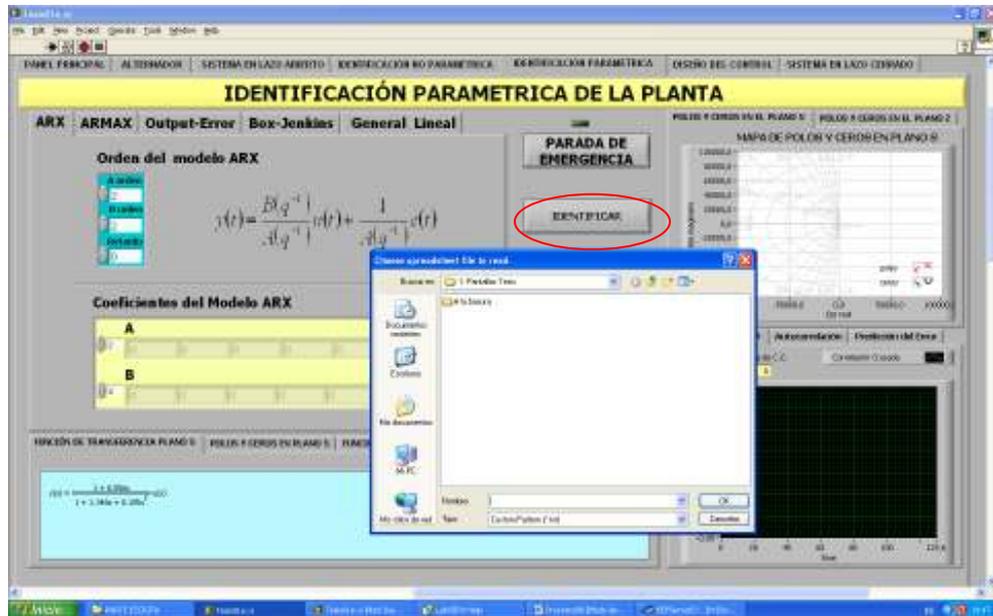
1.- Seleccionar la pestaña IDENTIFICACION PARAMETRICA.



2.- Seleccionar un modelo, con el número de polos y ceros, que se estimaron en la Identificación No Paramétrica, ajustar el tiempo de muestreo a 60 milisegundos y seleccionar como fuente de datos "Load From File".



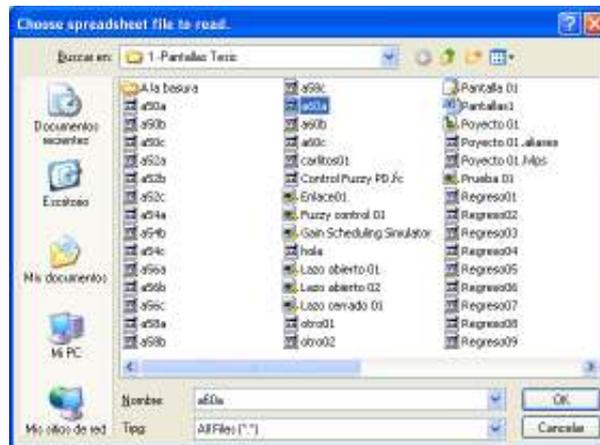
3.- Pulsar el botón Identificar, con lo que aparecerá la siguiente pantalla.



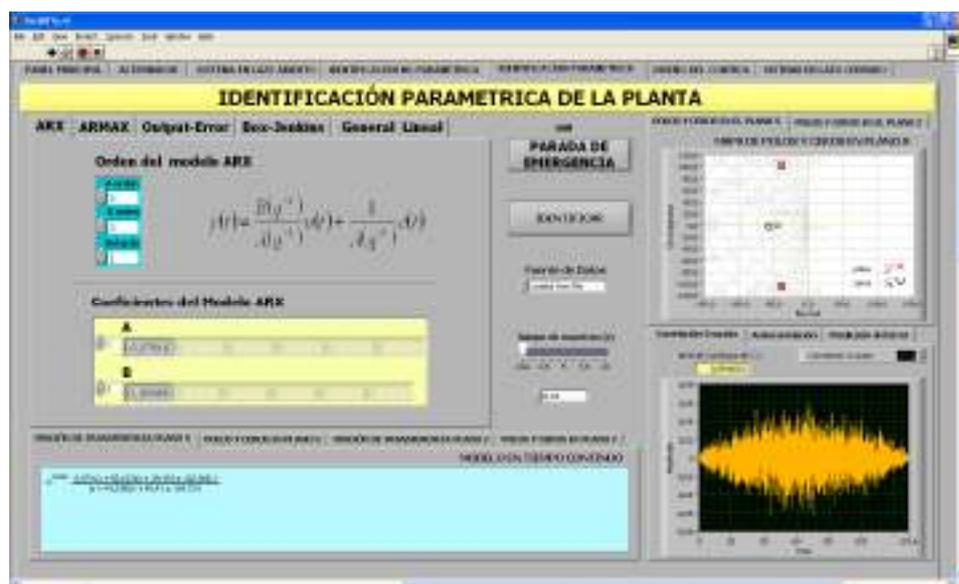
4.- Pulsar el botón Identificar, con lo que aparecerá la siguiente pantalla. Seleccionar “All Files(*.*)”.



5.- En la siguiente ventana seleccionar, el archivo donde guardo los datos de la Identificación, para el punto de operación requerido.



6.- Copiar la Función de Transferencia en la Tabla 4, también debe copiarse, el valor de la Autocorrelación, la Correlación cruzada y el error. Dentro de la columna de observaciones, anotar si la función obtenida, representa la dinámica del sistema y si es posible disminuir el número de polos y ceros.



Use la siguiente convención.

ARX 221 equivalente a decir Modelo ARX con 2 polos, 2 ceros y un retardo de tiempo

BJ 321 equivalente a decir Modelo Box Jenkins con 3 polos, 2 ceros y un retardo de tiempo

8.- Una vez que tenga llena la tabla, seleccione la función de transferencia que mejor representa la dinámica del sistema, para el punto de operación seleccionado. Si se desea obtener la función de transferencia para otros puntos de operación, se debe repetir el proceso.

9.- Anote las funciones de Transferencia obtenidas para los diversos puntos de operación.

Para 50 Hz. $G_1(s)=$ _____

Para 52 Hz. $G_2(s)=$ _____

Para 54 Hz. $G_3(s)=$ _____

Para 56 Hz. $G_4(s)=$ _____

Para 58 Hz. $G5(s)=$ _____

Para 60 Hz. $G6(s)=$ _____

10.- Proceda a anotar las conclusiones y recomendaciones:

Laboratorio No. 03.- Diseño de Control para la Planta Identificada.

Objetivo Sintonzar varios controladores PID, que permitan efectuar el Control apropiado de la Planta, para los diversos puntos de operación.

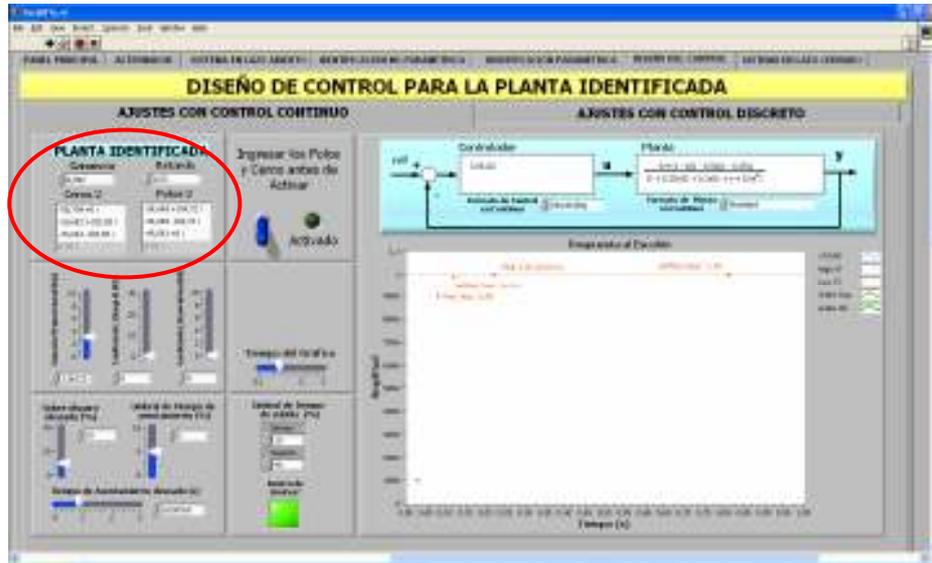
- Tareas**
- Efectuar la sintonización de la Planta de acuerdo al punto de operación asignado.
 - Ajustar los límites de sobredisparo porcentual y tiempo de asentamiento deseado para este sistema.

Herramientas Pantallas de Labview 8.6 desarrolladas para el Diseño de Control de la Planta.

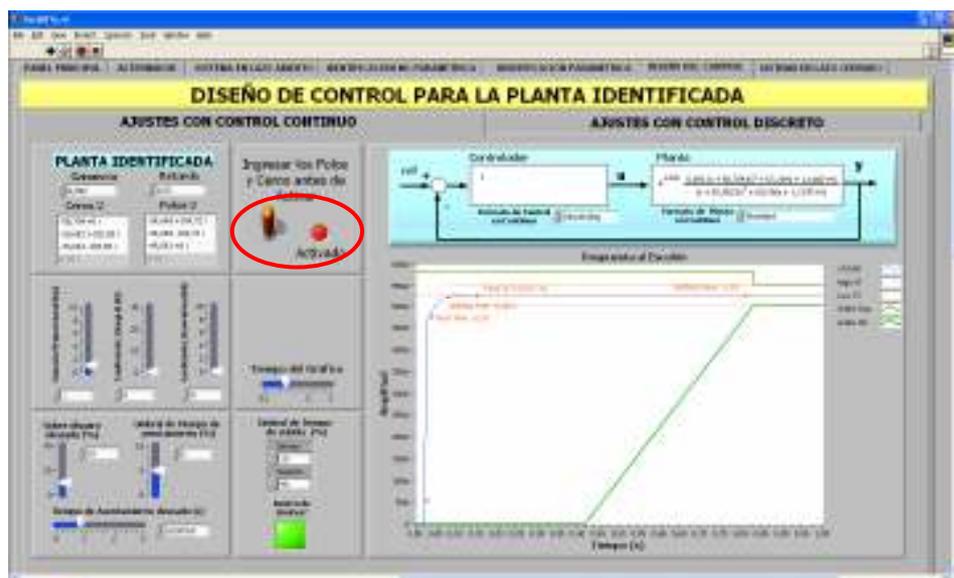
Literatura Ingeniería de Control Moderna
Por: Katsuhiko Ogata.

DESARROLLO

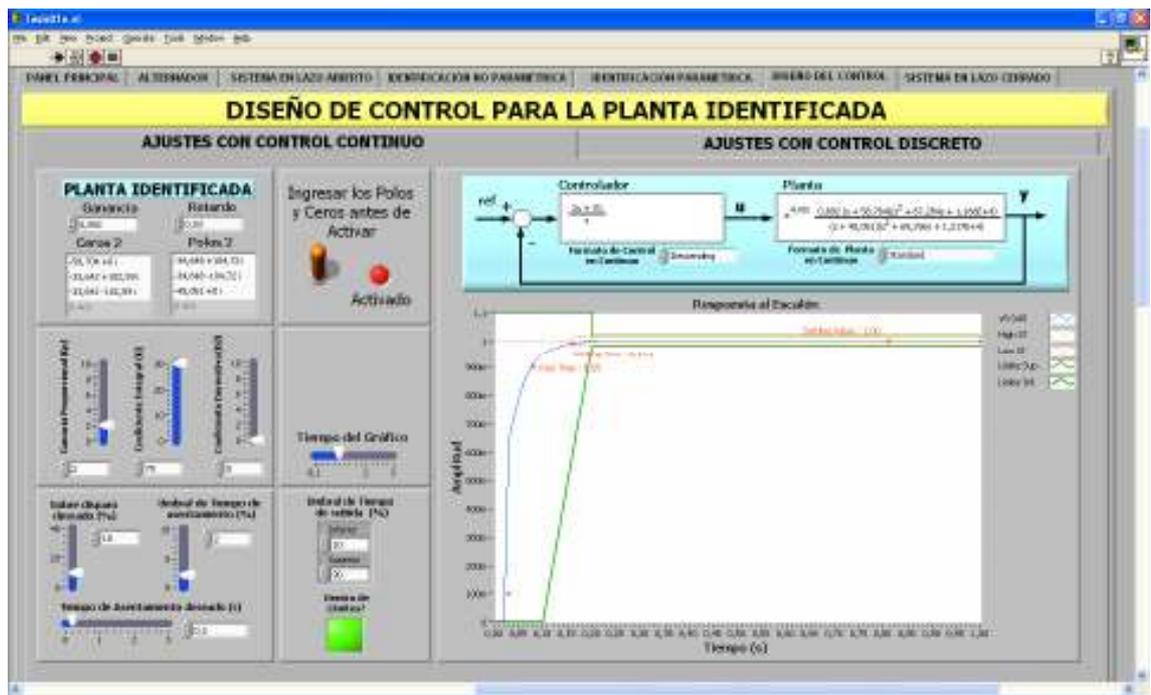
1.- Seleccionar la pestaña DISEÑO DE CONTROL.



2.- Ingresar los polos, ceros, ganancia y retardo, obtenidos en la Identificación Paramétrica, una vez efectuado esto activar el interruptor, con lo que se inician los correspondientes ajustes.



3.- Como se puede apreciar, se deben ajustar los valores de K_p , K_i y K_d para que el sistema, se comporte de tal manera que quede dentro de los parámetros seleccionados de sobredisparo porcentual y tiempo de asentamiento deseado.



Copie los valores de las ganancias obtenidas para este punto de operación escogido.

Frecuencia de Operación: Hz = _____.

Ganancia proporcional: K_p = _____.

Ganancia Integral: K_i = _____.

Ganancia Derivativa: K_d = _____.

Laboratorio No. 04.- Programación del Control Adaptativo de Ganancia Programada.

Objetivo	<p>Efectuar la programación del Control Adaptativo de Ganancia Programada, para efectuar el control de la frecuencia de salida del sistema, ante variaciones en la referencia.</p> <p>Cerrar el lazo de control y verificar que la Planta, está trabajando apropiadamente, dentro del rango de operación establecido.</p>
Tareas	<ul style="list-style-type: none">• Llenar la tabla de ganancias programadas obtenidas en el Laboratorio No. 03,• Calcular las constantes de tiempo T_i y T_d.• Habilitar el control en lazo cerrado y seleccionar los diversos puntos de operación para el cual el control de Ganancia programada fue creado.• Efectuar ajustes menores para mejorar el proceso.
Herramientas	<p>Pantallas de Labview 8.6 desarrolladas para el Sistema en Lazo Cerrado.</p>
Seguridad	<p>Se recomienda extremar las precauciones de seguridad, a partir de este punto, se podrán en movimiento partes mecánicas que podrían causar serias lesiones ó la muerte.</p>

DESARROLLO

1.- Active el interruptor de arranque Remoto y Arranque la planta en lazo abierto.



2.- Seleccionar la pestaña SISTEMA EN LAZO CERRADO.



3.- Calcular las constantes de tiempo T_i y T_d para los diversos puntos de operación, según las siguientes formulas:

$$T_i = (K_p \times T_s) / K_i$$

$$T_d = (K_d \times T_s) / K_p$$

Considere que $T_s = 0,060$ segundos.

4.- Calcular y llenar la TABLA No. 6.

TABLA No. 6

No.	Frecuencia	Kp.	Ti.	Td.	Observaciones
1					
2					
3					
4					
5					

5.- Llenar la tabla de Ganancias Programadas, según los datos obtenidos en el Laboratorio No. 03.



6.- Activar el control y cerrar el lazo, pulsando el botón de habilitar.



7.- Ajustar la referencia a un valor entre 50 y 60 Hz en la ventana F.R., usted podrá apreciar como la frecuencia de salida sigue a la referencia. En forma análoga, seleccionar el comportamiento del sistema al variar dicha referencia.



8.- Oscilar la referencia usando el botón Aplicar variación, el cual aplicara un paso escalón de 1 Hz. A la referencia.



Bibliografía

- Msc. Héctor Garcini, “**Sistemas de Control en Tiempo Continuo**”, Folleto de Maestria en Automatizacion y Control Industrial, año 2008 – 2009.
- Dr. Roger Misa Llorca, “**Sistemas Discretos**”, La Habana – Cuba, Marzo 2007.
- Eduardo F. Camacho y Carlos Bordons, **CONTROL PREDICTIVO: PASADO, PRESENTE Y FUTURO**, Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla, Octubre 2004.
- Dagoberto Montero, David B. Barrantes y Jorge M. Quirós, **Introducción a los sistemas de control supervisor y de adquisición de datos (SCADA)** , Monografía de Sistema de Control, Universidad de Costa Rica, año 2004.
- National Instrument, **Labview PID Control Toolkit User Manual**, www.ni.com, Junio 2008.