

## 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.

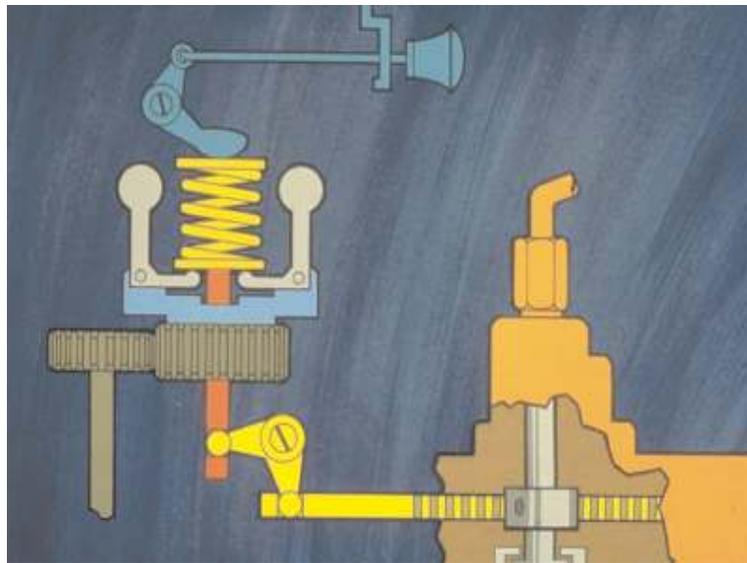
### **Instrumentos de recolección de Datos**

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.**

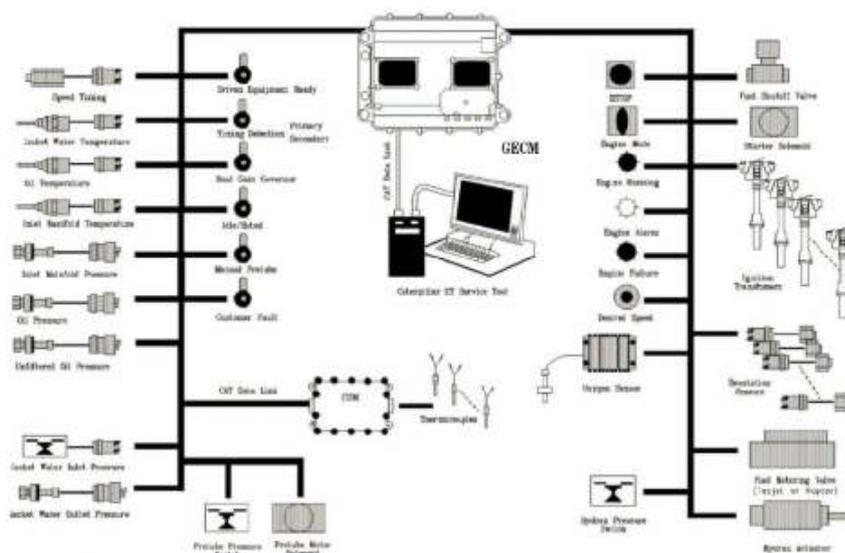
Avances tecnológicos en la electrónica trajeron la segunda generación de motores que accionaban a los grupos electrógenos, los cuales tienen gobernadores de velocidad electrónicos, con un actuador que mueve el varillaje de entrega de combustible y una tarjeta electrónica con un control proporcional integral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

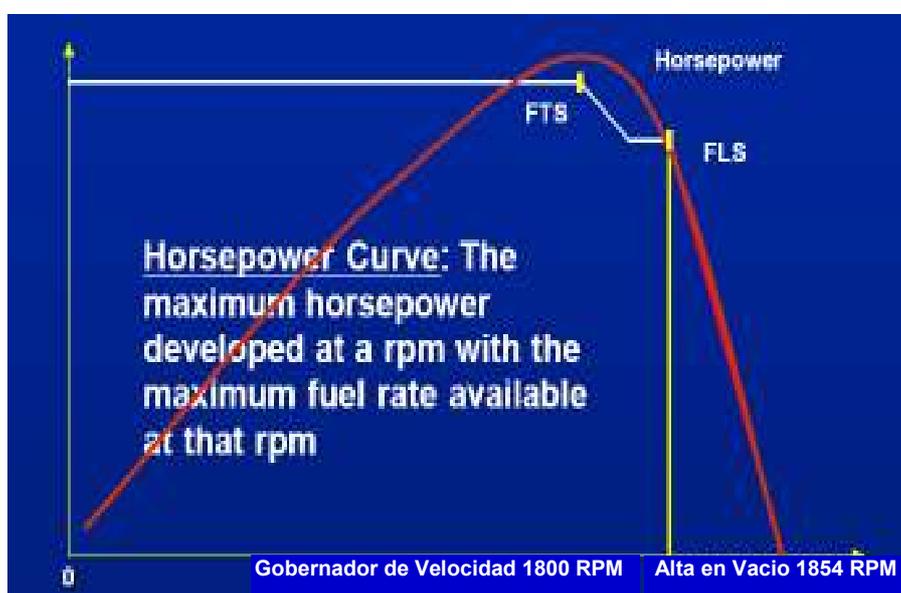


**Figura 03. Gobernador electrónico.**

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.

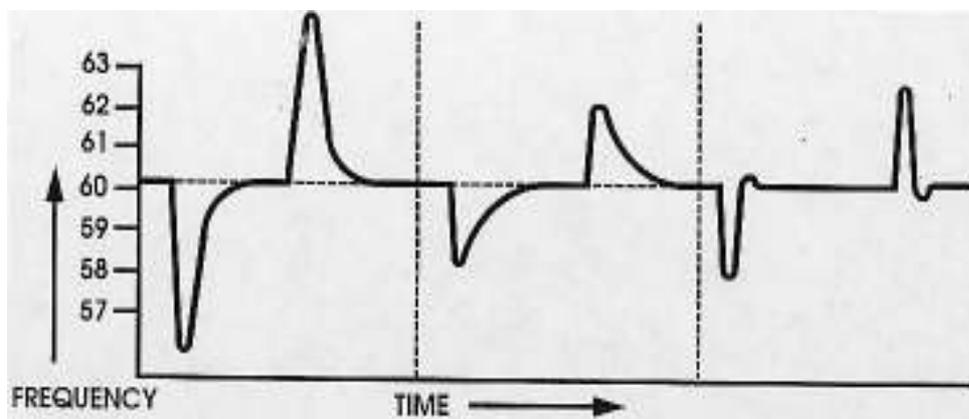
La curva característica de potencia desarrollada por un motor de combustión interna versus la velocidad la podemos ver en la Figura 04, En dicha curva se observa que la potencia desarrollada por los motores de combustión interna,

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.**

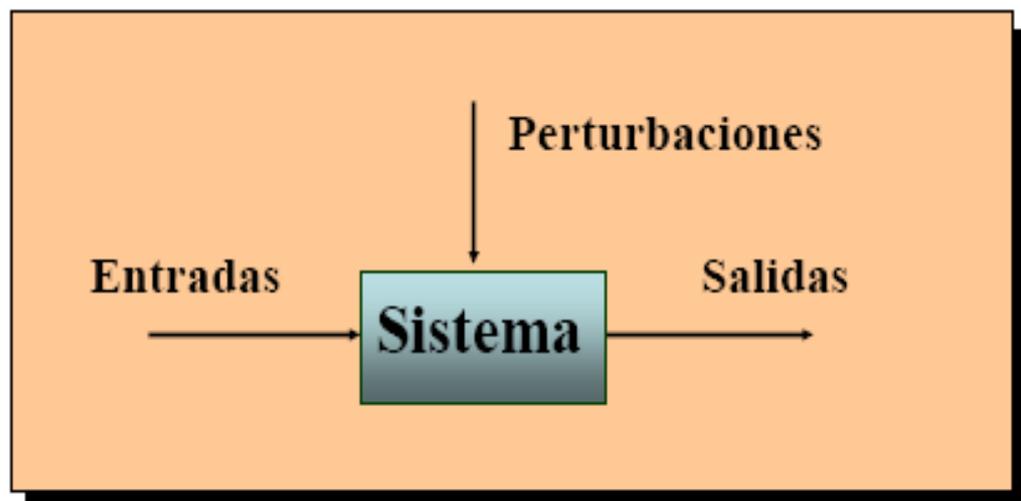
#### **2.1.1.- Introducción a Identificación de Sistemas.**

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.

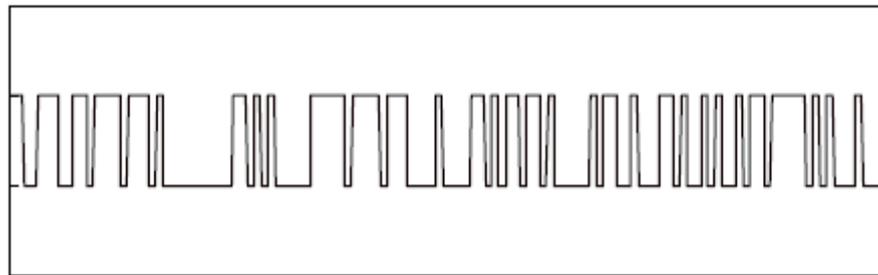
#### **2.1.4.3.- Elección del tipo de entradas.**

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:

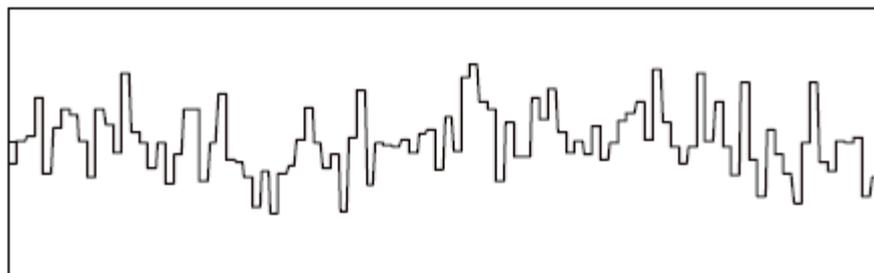
- La señal de entrada debe contener el mayor número de frecuencias posibles. Por ejemplo, una señal senoidal pura no es adecuada en un experimento de identificación, puesto que sólo se obtendrá la respuesta del sistema para la frecuencia de dicha señal. Por el contrario, las

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).

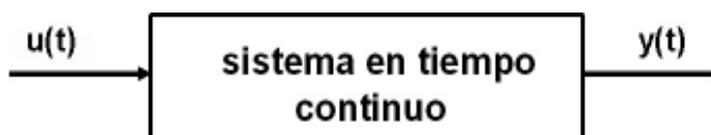


Figura 09. Salida  $y(t)$  ante entrada  $U(t)$ .

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:

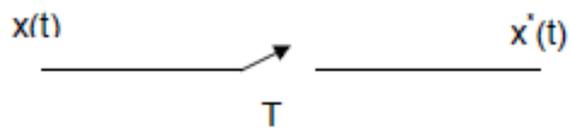
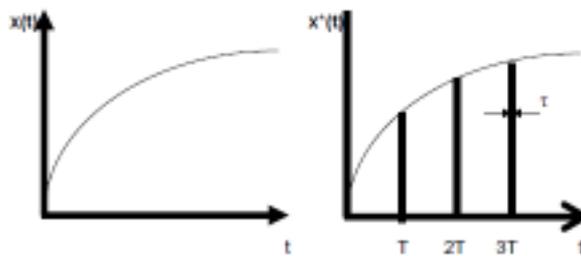


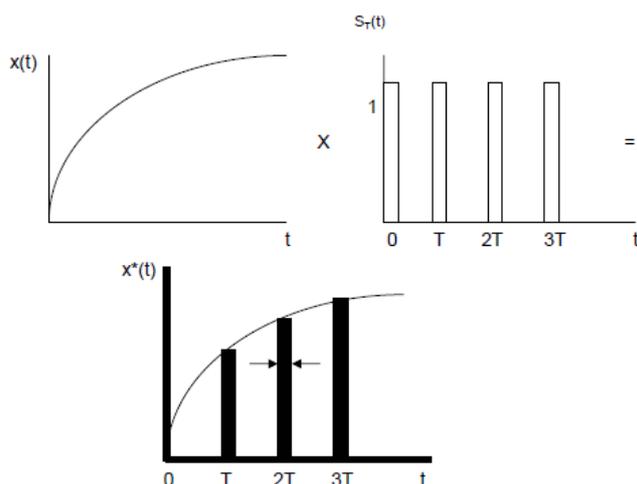
Figura 10. Muestreador.

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



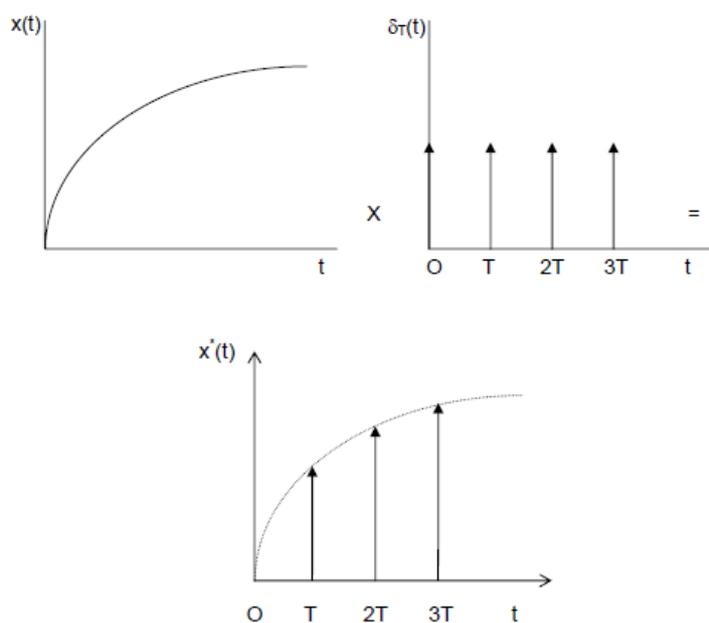
**Figura 11. Período de muestreo T.**

El ancho de los pulsos,  $\tau$ , 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  $\tau$  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:

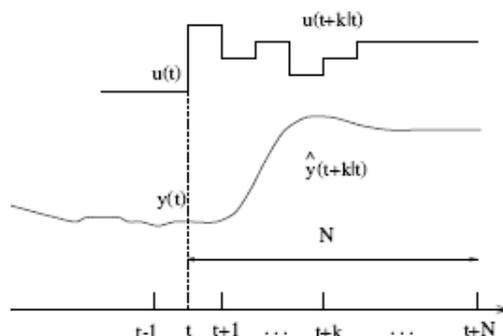
- Es una técnica particularmente atractiva para los operadores que requiere pocos conocimientos de control, porque los conceptos son muy intuitivos y la sintonización relativamente simple.
- Se puede utilizar para controlar una gran variedad de procesos, desde procesos muy simples, hasta procesos con 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  $k = 1 \dots N$  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.

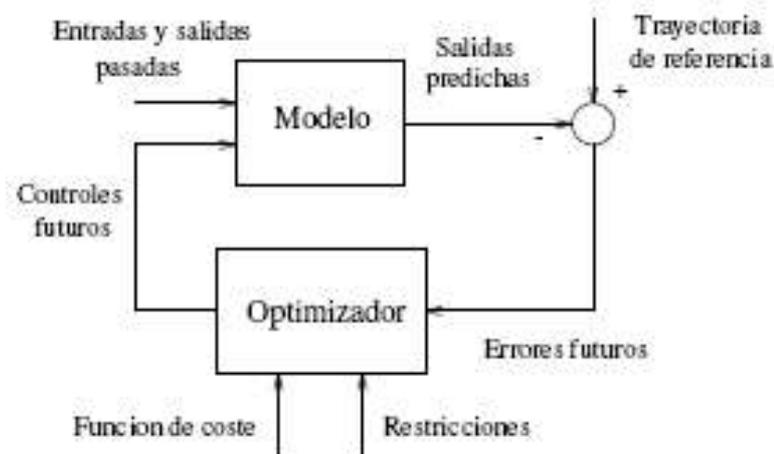


Figura 15. Modelo para predecir el estado de la salida.

### 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).

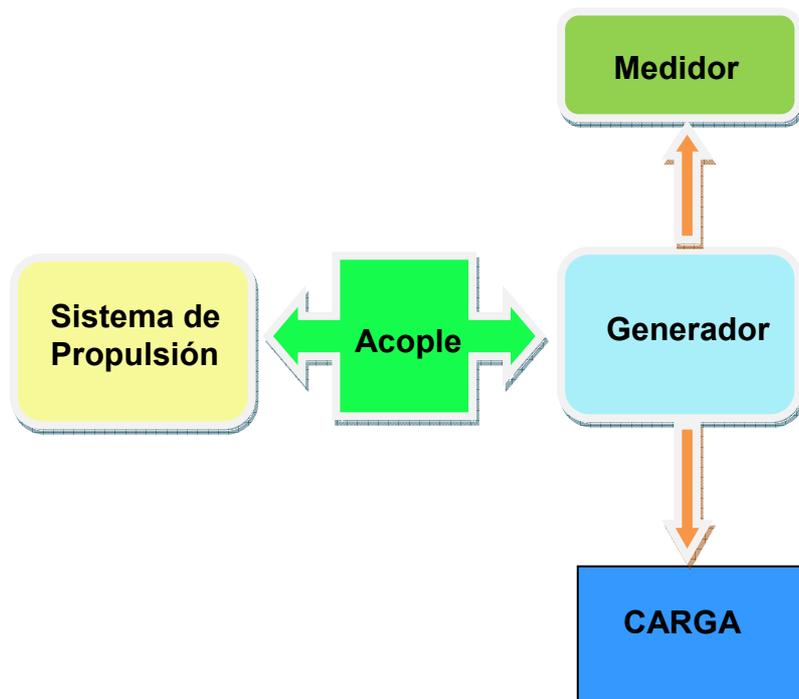


Figura 16. Sistema de Control en Lazo Abierto.

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.

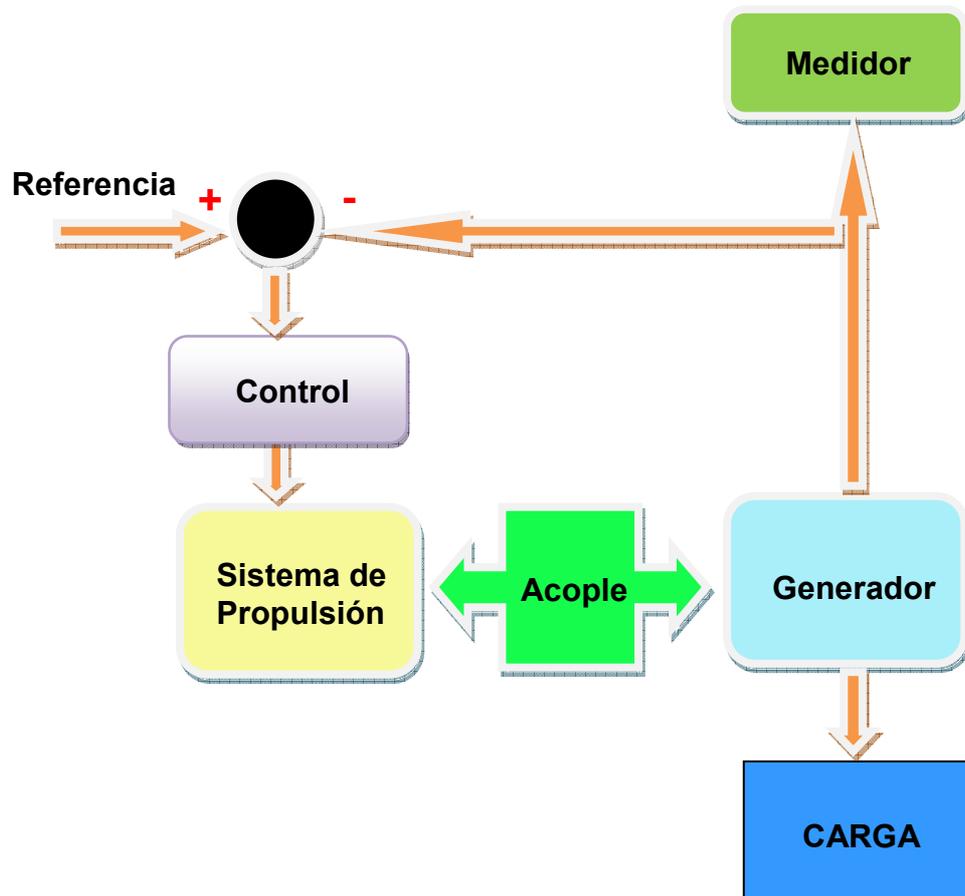


Figura 17. Sistema de Control en Lazo Cerrado.

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).

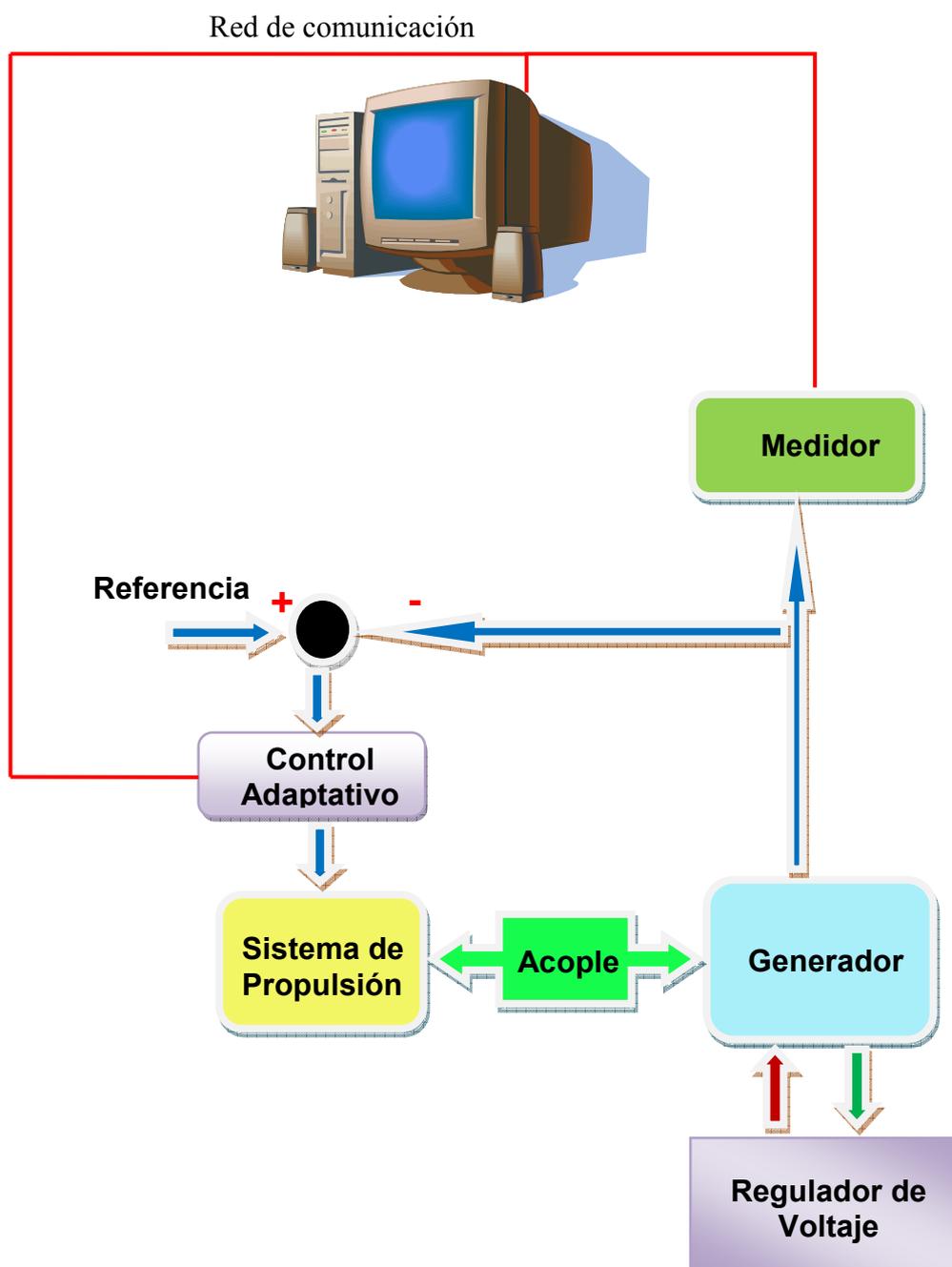


Figura 18. Diagrama de bloques de la Planta a Construir.

### **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, excitemos 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).

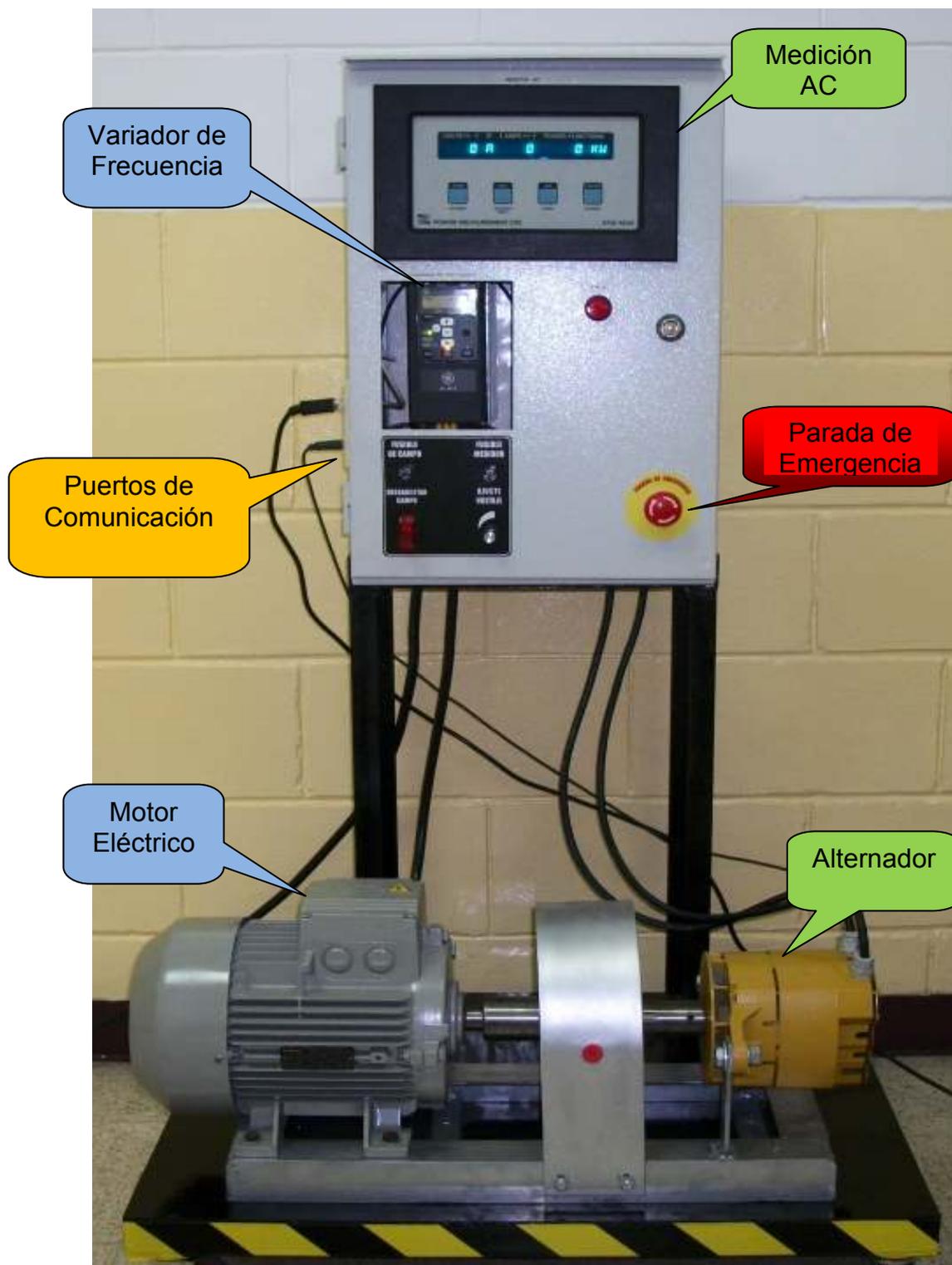


Figura 29. Planta terminada.

## 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).

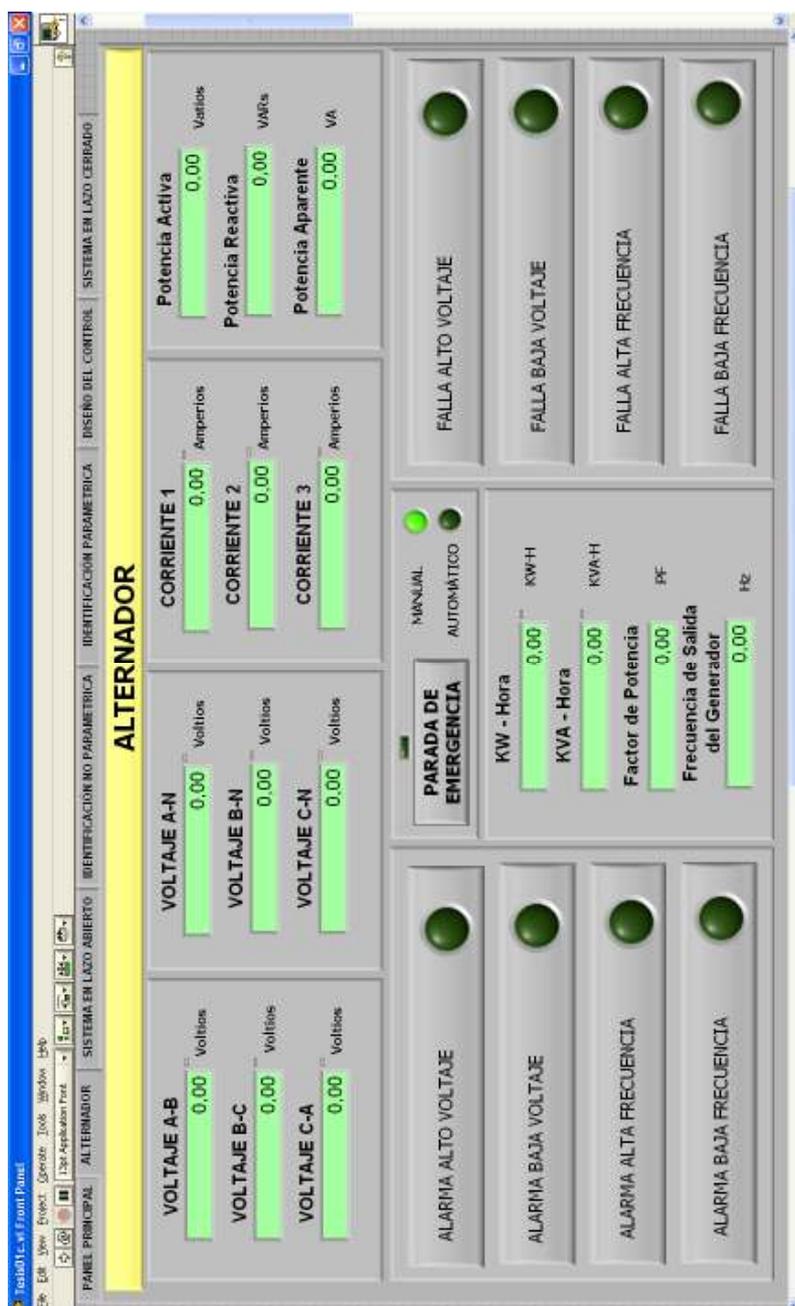


Figura 31. Pantalla de Parámetros del Alternador.

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).

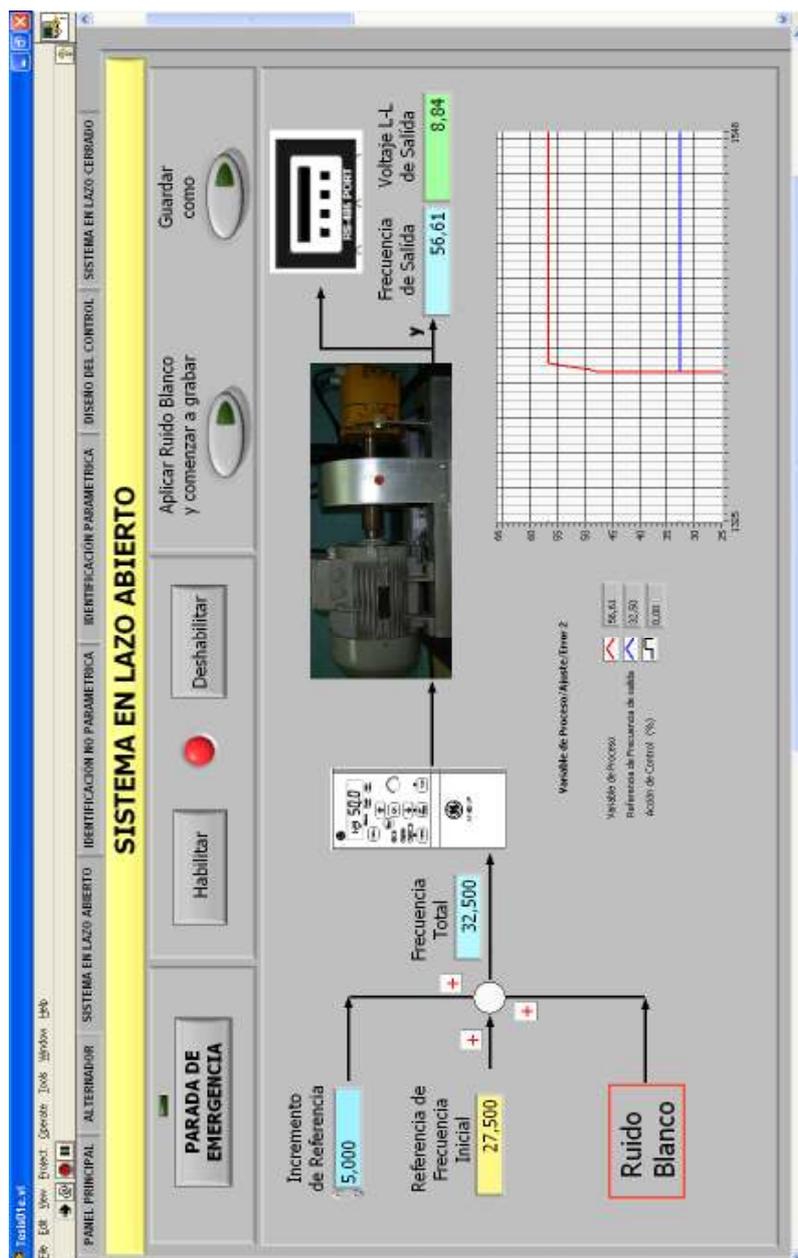


Figura 32 Pantalla de Sistema en Lazo Abierto.

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

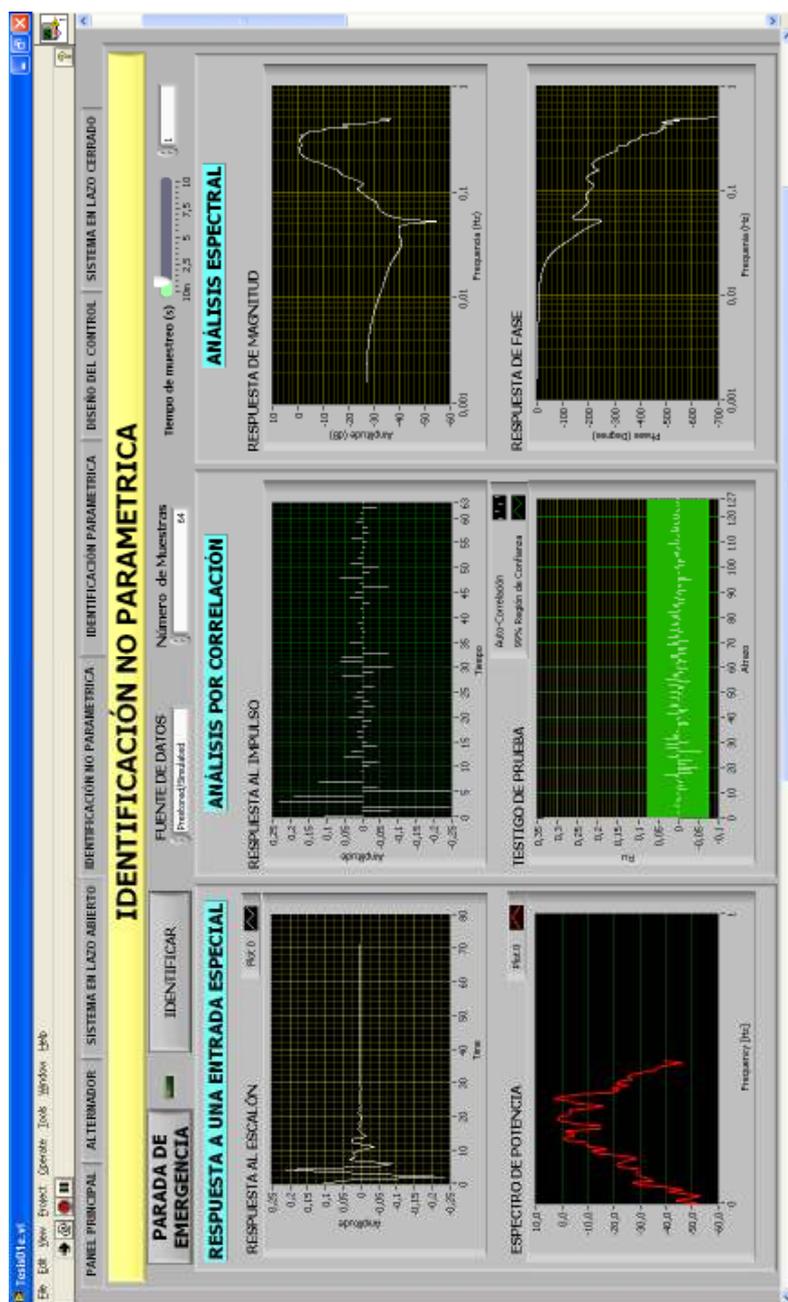


Figura 33. Pantalla de Identificación No Paramétrica.

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).

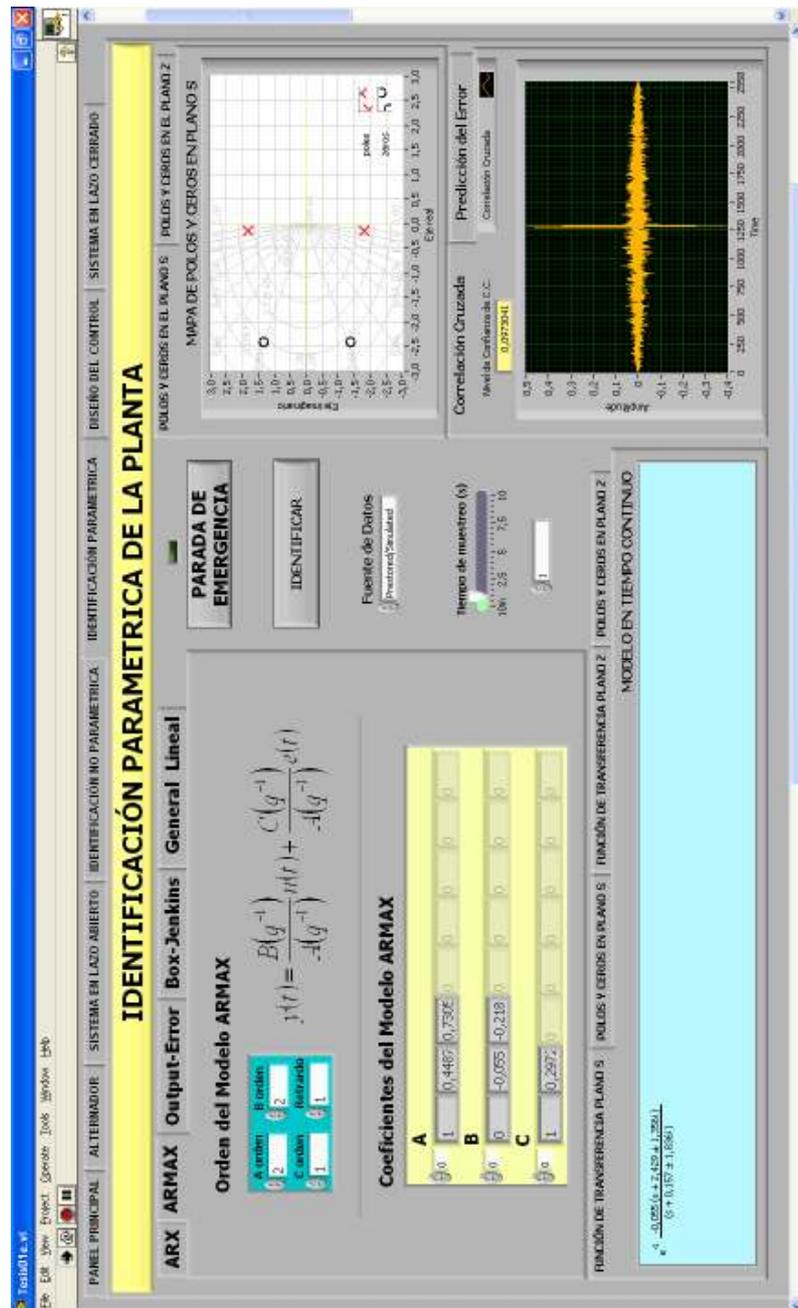


Figura 34. Pantalla de Identificación Paramétrica.

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

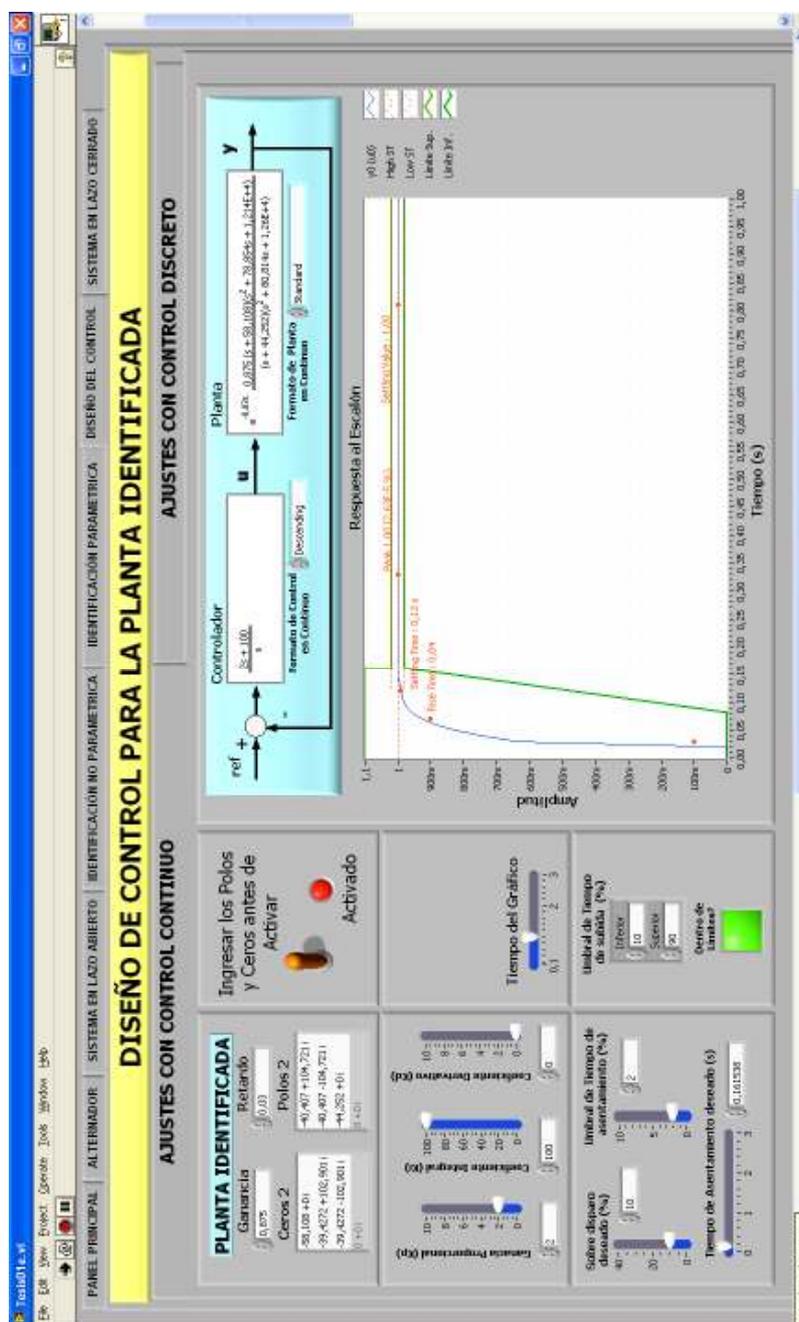


Figura 35. Pantalla de Diseño de Control en tiempo Continuo.

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

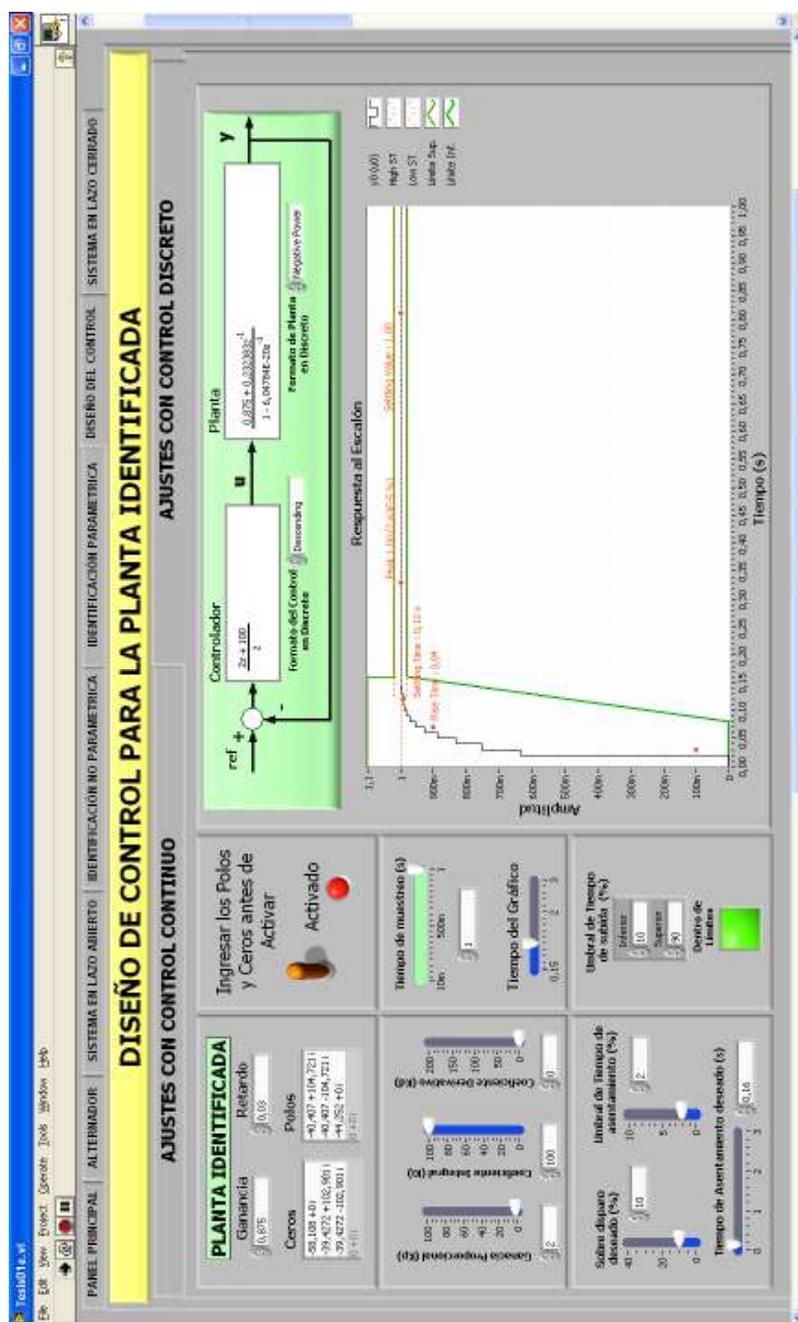


Figura 36. Pantalla de Diseño de Control en tiempo Discreto.

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).

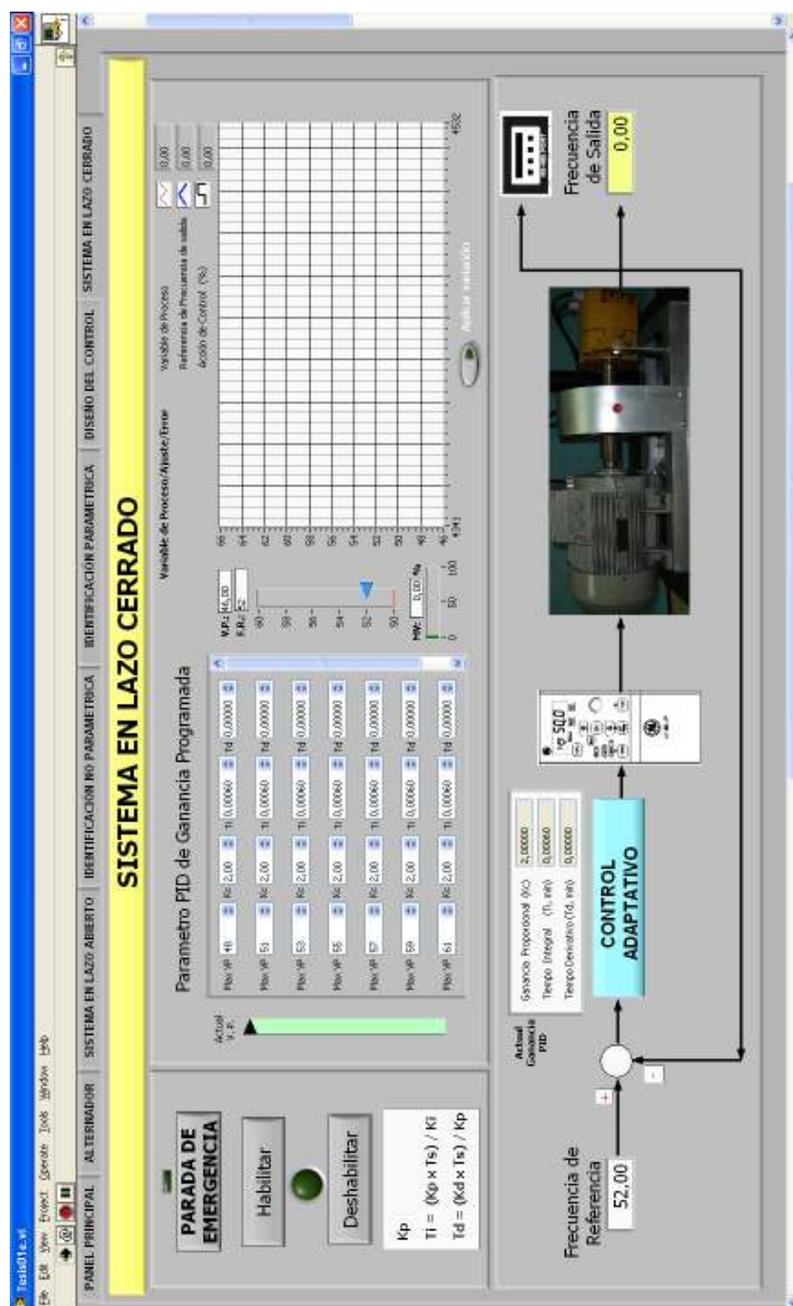


Figura 37. Pantalla de Control Adaptativo de Ganancia Programada en lazo Cerrado.

## **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.

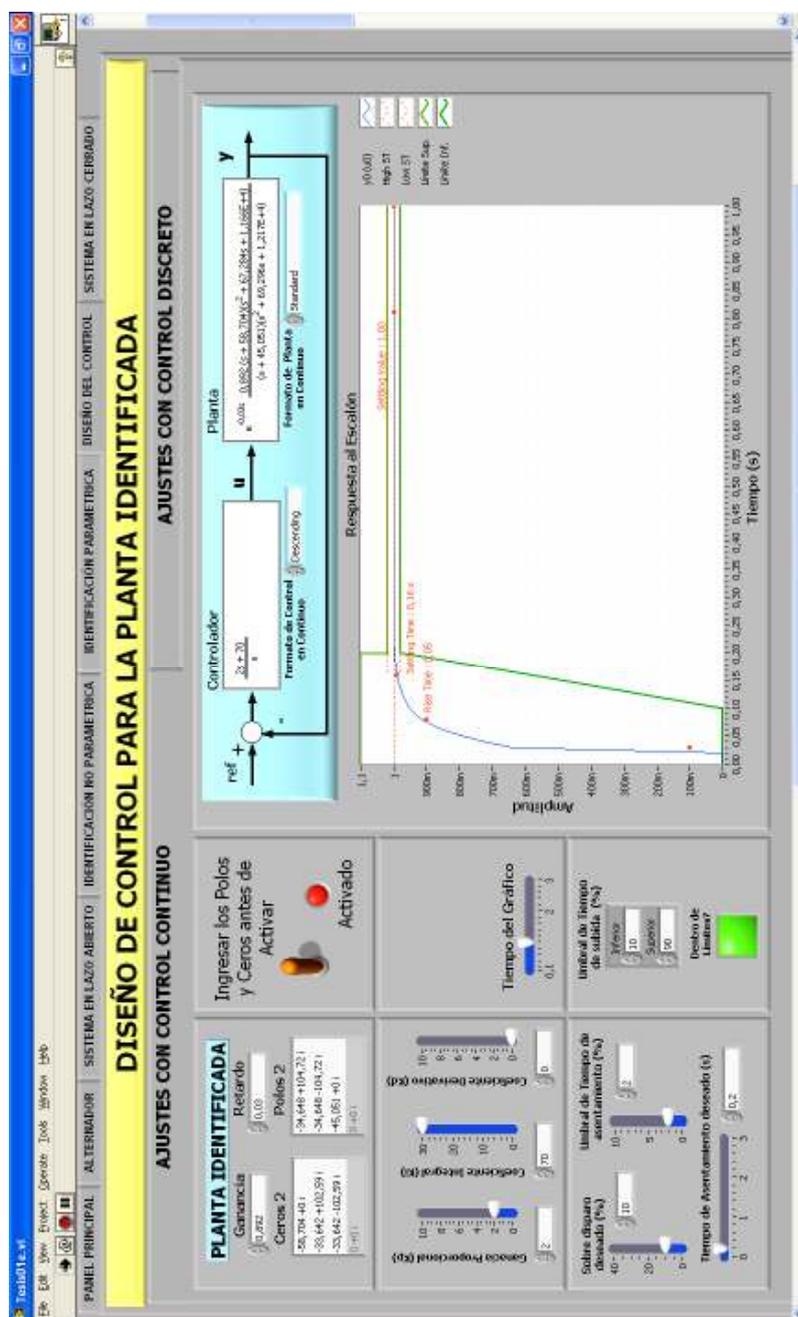


Figura 38. Pantalla de Diseño de Control en tiempo Continuo.

Los valores de las ganancias obtenidas son las siguientes:

**Tabla No. 1**

<b>No.</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Kp.</b>	<b>Ki.</b>	<b>Kd.</b>	<b>Observaciones</b>
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**

<b>No.</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Kp.</b>	<b>Ti.</b>	<b>Td.</b>	<b>Observaciones</b>
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.

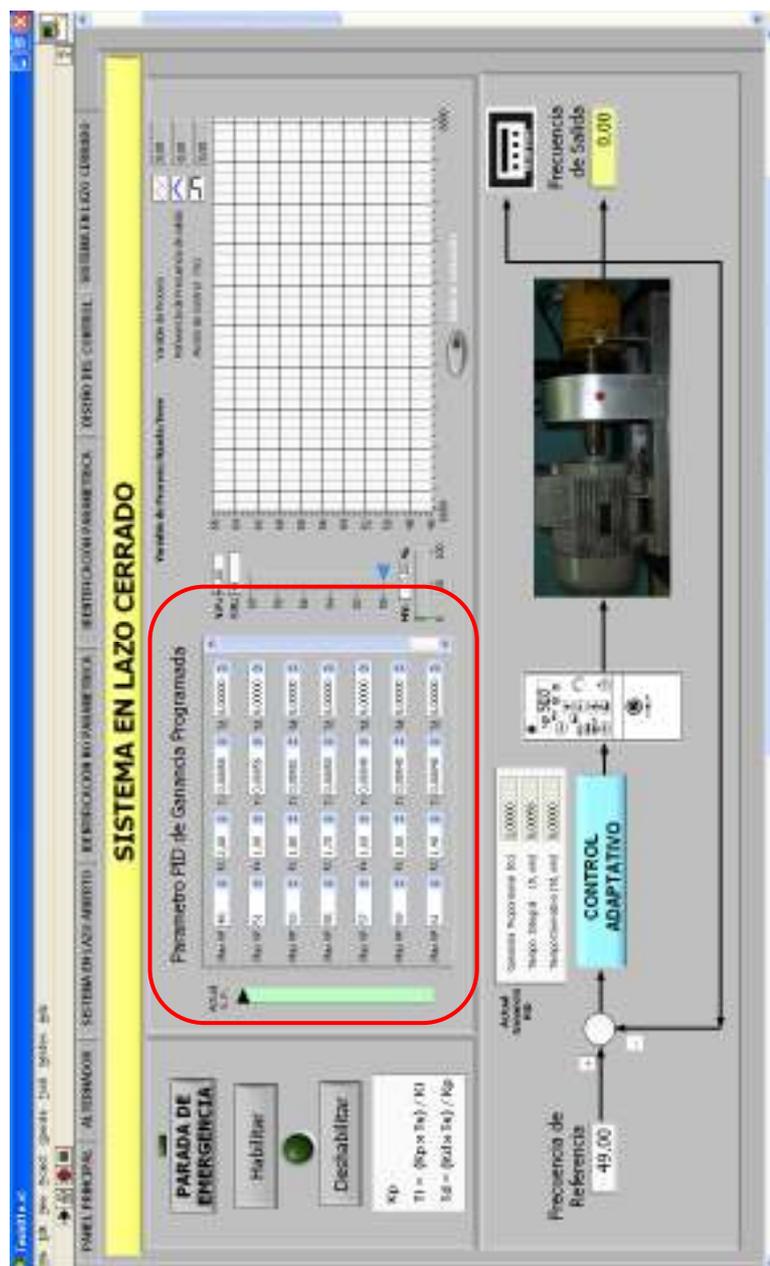


Figura 39. Pantalla de Control Adaptativo de Ganancia Programada en Lazo Cerrado.

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).

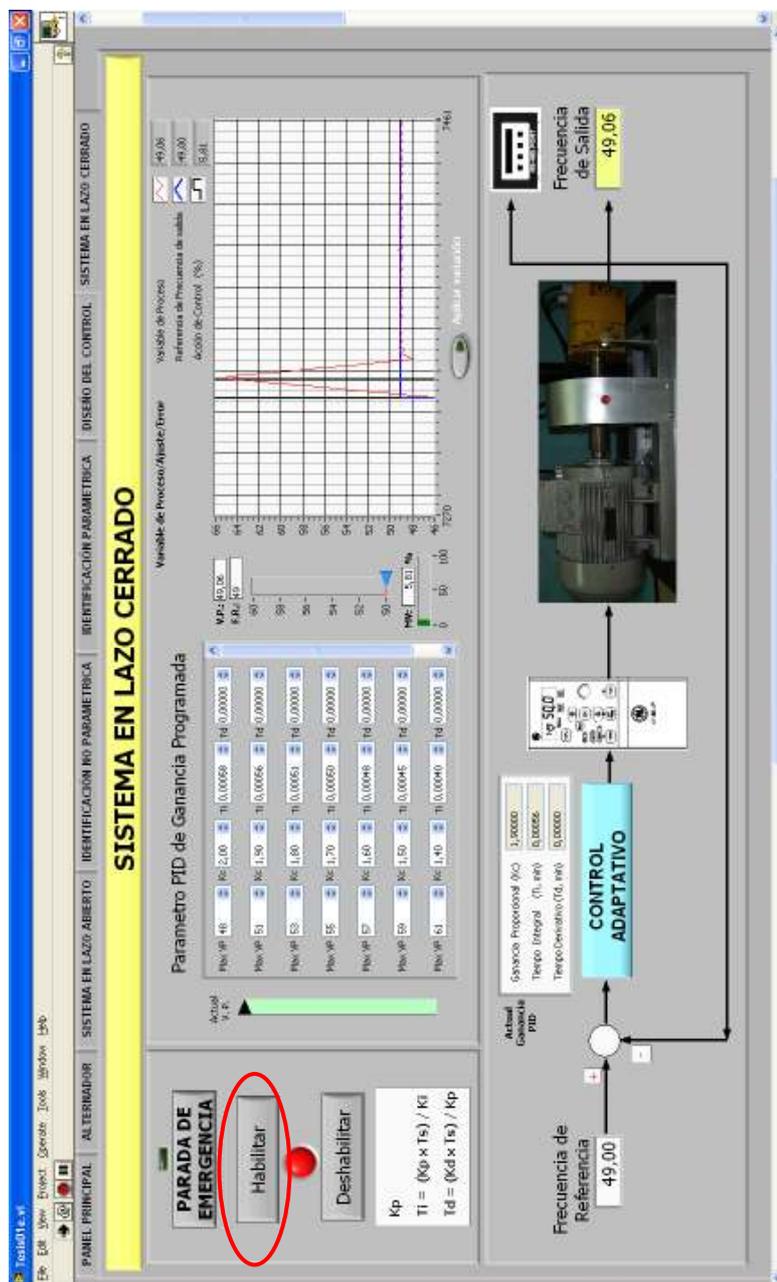


Figura 40. Interruptor de Activación Control Adaptativo de Ganancia Programada.

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.

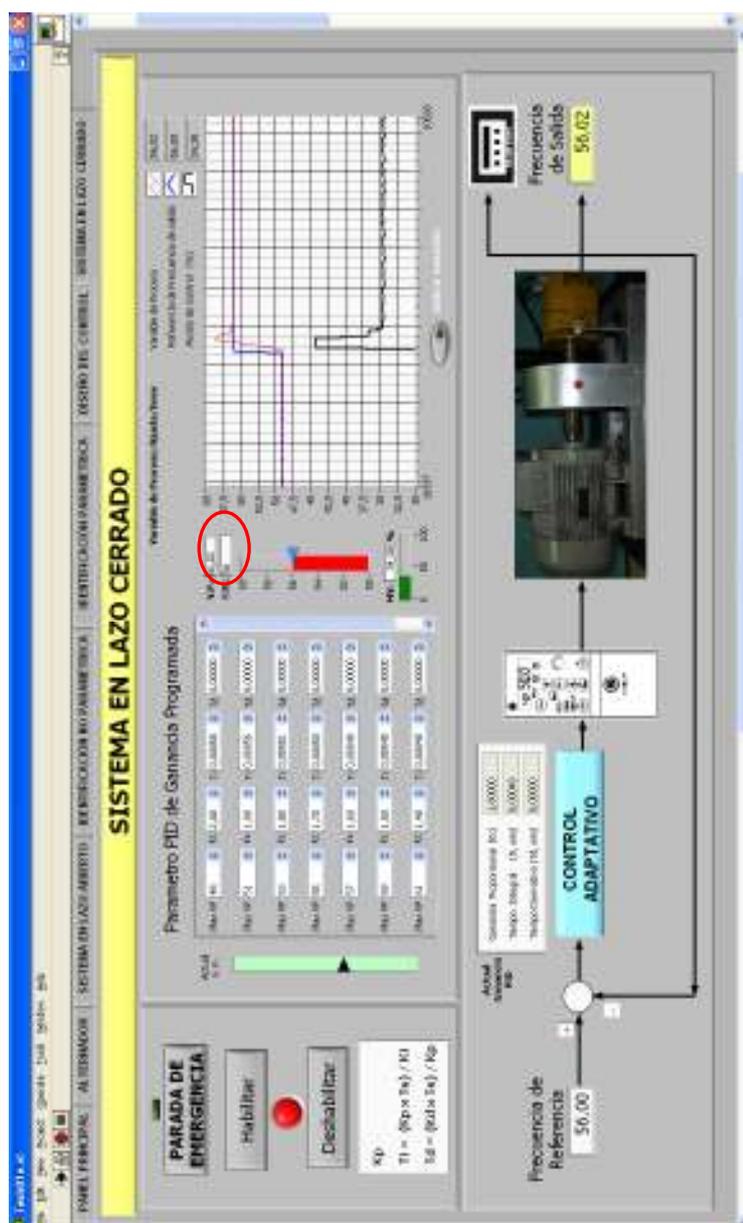


Figura 41. Ingreso de Referencia de Control Adaptativo de Ganancia Programada.

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**

<b>No.</b>	<b>Frecuencia</b>	<b><math>K_p</math>.</b>	<b><math>T_i</math>.</b>	<b><math>T_d</math>.</b>	<b>Observaciones</b>
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.