



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

~ Diseño e Implementación de un Sistema  
Controlador de Velocidad de un motor  
trifásico utilizando Matlab ~

Trabajo de Graduación

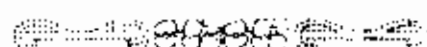
Previs a la obtención del título de:

**Ingeniero en Electricidad**

**Especialización Electrónica Industrial**

Presentada por:

Adrián Moisés Aranda Sánchez  
Omar Oswaldo Vásquez Suárez



Guayaquil - Ecuador

Año 2005



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**"Diseño e Implementación de un Sistema Controlador de  
Velocidad de un motor trifásico utilizando Matlab"**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN  
ELECTRÓNICA INDUSTRIAL**

Presentada por:

**Adrián Moisés Aranda Sánchez  
Omar Oswaldo Vásquez Suárez**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

Año: 2005



D-33742

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a DIOS por la oportunidad que nos brindó para estudiar.

A nuestros directores de tópicos Ing. Juan Del Pozo y Ing. Sara Ríos Orellana por la colaboración de sus conocimientos y por brindarnos su amistad en el desarrollo de este proyecto.

Al personal de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación que de una u otra manera nos ayudaron.

## **DEDICATORIA**

DEDICO ESTE TRABAJO A MI FAMILIA, QUE CON LA AYUDA DE DIOS PUDIERON BRINDARME LA OPORTUNIDAD DE ESTUDIAR, PARA SER UN BUEN PROFESIONAL Y UNA PERSONA DE BIEN. A MIS AMIGOS, QUE A LO LARGO DE MIS ESTUDIOS ME APOYARON DE UNA U OTRA MANERA PARA NO DESISTIR EN EL DURO CAMINO POR CULMINAR MIS ESTUDIOS. A LA FAMILIA VIZUETE ZAMBRANO QUE FUERON MI PUNTO DE APOYO DURANTE TODO ESTE TIEMPO.

ADRIAN ARANDA SANCHEZ

DEDICO ESTE TRABAJO A MIS PADRES Y HERMANOS QUE SIEMPRE FUERON UN APOYO EN LA REALIZACIÓN DE TODA MI CARRERA, A MIS AMIGOS QUE ME IMPARTIAN ANIMO EN LOS MOMENTOS DIFICILES, A LA FAMILIA BRIONES ZAVALA POR AYUDARME EN LA CULMINACIÓN DE ESTE GRAN PASO DE MI VIDA.

OMAR VASQUEZ SUAREZ

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



CIB-ESPOL



---

Ing. Miguel Yapur Auad  
SUBDECANO DE LA FIEC  
PRESIDENTE



---

Ing. Juan Del Pozo L.  
DIRECTOR DE TÓPICO



CIB-ESPOL



---

Ing. Denny Cortez A.  
MIEMBRO PRINCIPAL



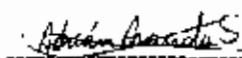
---

Ing. Efrén Herrera M.  
MIEMBRO PRINCIPAL

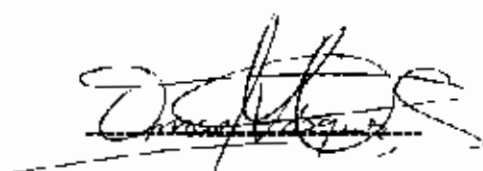
## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



**Adrián Aranda Sánchez**



**Omar Vásquez Suárez**

## RESUMEN

La planta construida para el desarrollo del sistema controlador esta constituida por un variador de frecuencia, un motor trifásico de inducción, un tacogenerador y una bomba de dirección hidráulica vehicular. Todos estos elementos se encuentran unidos directamente con acoples, las señales que necesita la planta para operar correctamente las proporciona un computador mediante una tarjeta de adquisiciones 6024E de Nacional Instruments.

Se realizará la conexión y comunicación entre el computador Maestro (Host) y el computador Remoto (Target), estos tendrán el objetivo de controlar y permitir ver el funcionamiento de la planta por medio de osciloscopios virtuales desarrollados previamente en la programación de Simulink.

El funcionamiento dinámico del módulo o planta queda registrado en la memoria seleccionada para el computador Remoto, este computador tiene por objetivo adquirir los datos y presentarlos; luego de completada la simulación, se transfieren estos datos a Matlab en forma matricial para efectuar con los mismos la creación de un modelo matemático que simule el dinamismo de la planta.

Con este modelo se efectúan las diversas pruebas que son comparadas con las que se realizan a la propia planta de trabajo, de esta manera se asegura de si es correcta la elección del modelo.

La debida configuración en el sistema XPC Target permitirá realizar el control del sistema sin necesidad de mantener abierto el programa Matlab en el computador Maestro.

El objetivo principal de este proyecto es realizar prácticas en la planta que se construye y que esta se controle bajo el dominio de Matlab, por eso el controlador de esta planta es desarrollado bajo un esquema de prácticas de laboratorio.

Al Utilizar los conocimientos teóricos de elección de un controlador y de acuerdo con la respuesta dinámica del sistema se escoge el método de Ziegler-Nichols para el desarrollo de una de las prácticas, para otra práctica el ajuste del sistema controlador mediante el uso de la herramienta SISO, y por último el desarrollo del modelo matemático de la planta usando el Identificador de Sistemas (System Identification).



# ÍNDICE GENERAL



CIB-ESPOL

<b>RESUMEN</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b>VIII</b>
<b>ABREVIATURAS</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>XVIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1</b>	
<b>1. MODULO DE CONTROL DE VELOCIDAD DE</b>	
<b>UN MOTOR TRIFÁSICO</b>	<b>2</b>
1.1. Generalidades	2
1.2. Descripción del Módulo de Control de Velocidad de un Motor Trifásico	4
1.2.1. Funcionamiento del Control de Velocidad de un Motor Trifásico	6
1.2.2. Característica de un Sistema de Control	8
1.3. Sensores y Actuadores	9
1.3.1. Descripción del Sensor de Velocidad	10

1.3.2. Descripción del Variador de Frecuencia	12
1.4. Circuitos Auxiliares	15
1.4.1. Circuito de Encendido y Apagado del Modulo de Control de Velocidad	15

## **CAPITULO 2**

2. INTERFASE Y PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCION DEL SISTEMA CONTROLADOR DE VELOCIDAD EN SIMULINK	19
2.1 Conexión y/o Comunicación entre Host-Target	20
2.2 Interfase Y Programación en Simulink	21
2.2.1 Descripción de la Programación en Simulink	22
2.2.1.1. Definición y Parametrización de Bloques y/o Iconos	29

## **CAPITULO 3**

3. ADQUISICION DE DATOS Y CREACION DEL MODELO DINAMICO DEL SISTEMA CONTROLADOR DE VELOCIDAD	43
3.1. Equipos para la Adquisición de Datos	44
3.2. Configuración del Sistema en Simulink	45
3.2.1. Configuración de los Parámetros de	

Simulación del Sistema	49
3.2.2. Ejecución de la Programación y Recuperación De los datos	53
3.3. Utilización de la Herramienta de Trabajo de Matlab Identificador de Sistemas (System Identifications)	56
3.3.1. Descripción de Pizarras de Datos	58
3.3.2. Descripción de Pizarras de Modelos	64
3.3.3. Validación del Modelo Dinámico creado	71

## **CAPITULO 4**

4. ELABORACION DE PRACTICAS	80
4.1. Ajuste de la Respuesta del Sistema utilizando la herramienta Single Input Single Output (SISO) de Matlab	80
4.1.1. Objetivos	80
4.1.2. Teoría	81
4.1.3 Procedimientos	88
4.2. Determinación del Modelo Matemático Usando el Software System Identification	101
4.2.1. Objetivos	101
4.2.2. Teoría	101

4.2.3. Procedimiento	103
4.2.4. Validación del Modelo	110
4.3. Determinación de los Parámetros del Controlador por el Método de Ziegler-Nichols	113
4.3.1. Objetivos	113
4.3.2. Teoría	113
4.3.3. Procedimiento	115
4.3.4. Cálculos	122

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **ANEXOS**

**Motor Trifásico**

**Variador de Velocidad Micromaster 420**

**Tarjeta de Adquisición de Datos 6024E**

**Comunicación Host- Target**

**Control PID Clásico**

### **BIBLIOGRAFIA**

## ABREVIATURAS

RPM	Revoluciones por minuto
V	Voltios
A	Amperios
K $\Omega$	Kilo ohmios
Hz	Hertz
mHz	mili Hertzios
Host	Computador maestro donde se realiza la programación del sistema controlador de velocidad.
Target	Computador Remoto, donde se descargan las aplicaciones de la programación desarrollada en el computador maestro.
xPC Target	Programa destinado a realizar comunicación y ejecución de aplicaciones en tiempo real.
Workspace	Espacio de memoria del programa Matlab destinado a mantener la información de los archivos que se emplean para trabajar.
System Identification	Herramienta de Matlab destinada a construir modelos matemáticos de plantas reales

<b>SISO</b>	<b>Única entrada única salida, herramienta de Matlab destinada a análisis de Funciones de Transferencias de sistemas o procesos de trabajo.</b>
<b>Set Point</b>	<b>Señal de entrada deseada que se aplica al sistema</b>
<b>xpcsetup</b>	<b>Comando o instrucción que permite ingresar a la ventana de configuración de parámetros del sistema xPC target.</b>
<b>PPB</b>	<b>Panel de Programación Básica</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.2.1	Modulo de Control de Velocidad de un Motor Trifásico	4
FIGURA 1.2.2	Esquema del Control de Velocidad	5
FIGURA 1.2.1.1	Motor Trifásico de Inducción	6
FIGURA 1.3.1.1	Bosquejo de los componentes del Tacogenerador	10
FIGURA 1.3.1.2	Sensor de Velocidad	11
FIGURA 1.3.1.3	Conexión Interna	11
FIGURA 1.3.2.1	Variador de frecuencia Micromaster 420	13
FIGURA 1.3.2.2	Circuito de fuerza del variador de frecuencia	13
FIGURA 1.3.2.3	Panel de programación Básico	14
FIGURA 1.4.1.1	Circuito de fuerza del Modulo de Control de Velocidad	16
FIGURA 1.4.1.2	Circuito Eléctrico de Control	17
FIGURA 2.1.1	Conexión por red	20
FIGURA 2.2.1.1	Librerías de Simulink	23
FIGURA 2.2.1.2	Modelo de programación de bloques en Lazo Abierto	26
FIGURA 2.2.1.3	Diagrama de bloques de un Sistema Típico con Realimentación	27
FIGURA 2.2.1.1.1	Cuadro de Parámetros del Ajuste	31
FIGURA 2.2.1.1.2	Cuadro de Parámetros de Señal de Ajuste	32
FIGURA 2.2.1.1.3	Cuadro de parámetros de Alimentación al Set Point	33
FIGURA 2.2.1.1.4	Cuadro de parámetros de Alimentación al Set Point y Voltaje al Variador	34
FIGURA 2.2.1.1.5	Cuadro de parámetros de entrada del Set Point y voltaje del tacogenerador	36
FIGURA 2.2.1.1.6	Cuadro de Parámetros del Filtro	37
FIGURA 2.2.1.1.7	Cuadro de Parámetros del Error	38
FIGURA 2.2.1.1.8	Modelo Programación de Bloques Final	42
FIGURA 3.1.1	Instalación de Tarjeta PCI 6024E	44
FIGURA 3.2.1	Programación para Adquisición de Datos	47
FIGURA 3.2.2	Señal de Prueba	48
FIGURA 3.2.1.1	Selección de Parámetros	50

FIGURA 3.2.1.2	Parámetros de Simulación Solver	50
FIGURA 3.2.1.3	Parámetros de Simulación Workspace I/O	51
FIGURA 3.2.1.4	Parámetros de Simulación Real Time - Workshop	52
FIGURA 3.2.2.1	Control Remoto XpcTarget	54
FIGURA 3.2.2.2	Señal de Entrada al Sistema	55
FIGURA 3.2.2.3	Señal de Salida del Sistema	55
FIGURA 3.3.1	Ventana del Identificador de Sistemas	58
FIGURA 3.3.1.1	Cuadro de Diálogo Importar Datos	59
FIGURA 3.3.1.2	Representación Gráfica de Datos	60
FIGURA 3.3.1.3	Representación de datos con y sin eliminación de Niveles Constantes	61
FIGURA 3.3.1.4	Selección de Rangos de Trabajo y Validación de Modelos	62
FIGURA 3.3.1.5	Selección Empezar Rápido	63
FIGURA 3.3.1.6	Pizarras de Datos	64
FIGURA 3.3.2.1	Visualización de Pizarras de Modelos Paramétricos	65
FIGURA 3.3.2.2	Respuesta de Transiente	69
FIGURA 3.3.2.3	Respuesta de Frecuencia	70
FIGURA 3.3.2.4	Mapa de polos y zeros en Tiempo Discreto	70
FIGURA 3.3.3.1	Resultados de los Modelos	72
FIGURA 3.3.3.2	Modelos Ingresados al Workspace	73
FIGURA 3.3.3.3	Respuesta de Modelos a una Entrada Escalón Unitario	78
FIGURA 4.1.2.1	Respuesta a Entrada Escalón	81
FIGURA 4.1.2.2	Parámetros de la Función de Transferencia	82
FIGURA 4.1.2.3	Sistema de Control de velocidad	83
FIGURA 4.1.2.4	Ventana de Diseño SISO	85
FIGURA 4.1.3.1	Curva de Respuesta del Sistema	87
FIGURA 4.1.3.2	Proceso de Control de Velocidad	88
FIGURA 4.1.3.3	Respuesta de ambos Sistemas a una Entrada tipo Escalón en Lazo Abierto	91
FIGURA 4.1.3.4	Trayectoria de las Raíces del Proceso de Control de Velocidad	93
FIGURA 4.1.3.5	Respuesta del Sistema a una Entrada tipo Escalón	94
FIGURA 4.1.3.6	Respuesta del Sistema con Controlador Proporcional	94



FIGURA 4.1.3.7	Resultados Prácticos de la Planta con Controlador Proporcional	95
FIGURA 4.1.3.8	Trayectoria de las Raíces del Sistema con Controlador PI	98
FIGURA 4.1.3.9	Respuesta del Sistema con Controlador PI	99
FIGURA 4.1.3.10	Respuesta de la Planta a un Controlador PI	100
FIGURA 4.2.2.1	Ventana del Identificador de Sistemas	102
FIGURA 4.2.3.1	Cuadro de dialogo Importar Datos	105
FIGURA 4.2.3.2	Representación de datos con y sin eliminación de Niveles constantes	108
FIGURA 4.2.3.3	Pizarras de Datos	107
FIGURA 4.2.3.4	Visualización de Pizarras de Modelos Paramétricos	108
FIGURA 4.2.4.1	Resultados de los Modelos	110
FIGURA 4.2.4.2	Respuesta del Modelo ARX(441) a una entrada Escalón Unitario	111
FIGURA 4.2.4.3	Respuesta de modelos a una entrada Escalón Unitario	112
FIGURA 4.3.2.1	Modelos de Búsqueda de Parámetros	114
FIGURA 4.3.3.1	Sistema en Lazo Abierto	116
FIGURA 4.3.3.2	Parámetros de Simulación	117
FIGURA 4.3.3.3	Sistema en Lazo Abierto	118
FIGURA 4.3.3.4	Selección de Opciones para Graficar la Respuesta del Sistema	119
FIGURA 4.3.3.5	Respuesta del Sistema en Lazo Abierto a una Entrada de tipo Escalón	119
FIGURA 4.3.3.6	Curva de Respuesta para Obtención de Parámetros del Controlador	120
FIGURA 4.3.3.7	Parámetros de la Curva de Respuesta	121
FIGURA 4.3.4.1	Reacción de la Planta en Lazo Cerrado frente a una Entrada Tipo Escalón	124

**ÍNDICE TABLAS**

<b>TABLA 4.3.2.1</b>	<b>Selección del Controlador</b>	<b>115</b>
----------------------	----------------------------------	------------

## INTRODUCCION

Gracias entre otros factores al desarrollo de la electrónica de potencia y a la tecnología hoy en día podemos controlar un proceso automáticamente, debido a esto los motores de inducción están sustituyendo a los de corriente continua en aquellas aplicaciones en que se necesita un control de la velocidad.

En comparación a otros tipos de circuitos, los de electrónica de potencia tienen características únicas que hacen su simulación particularmente desafiante, entre estas se puede mencionar la conmutación a altas frecuencias, gran tamaño y complejidad, largos tiempos de simulación, problemas de convergencia, etc.

Pero no es necesario contar con paquetes especiales, ya que por medio de la manipulación de modelos se puede reducir considerablemente los tiempos de simulación, además de los problemas de convergencia presentes en las técnicas tradicionales de simulación.

Para ello se utilizará el software Matlab que corre bajo varios sistemas operativos; y, es un lenguaje no solo de instrumentación sino de varias aplicaciones y análisis desarrollados para PCs.

Con la ayuda de las herramientas que tiene este software, y el conocimiento del sistema o planta construida en este proyecto, se realizará *El Diseño e Implementación de un Sistema Controlador de Velocidad de un Motor Trifásico usando Matlab*, para ello se creará un modelo matemático de la planta y se aplicarán las técnicas clásicas aprendidas en el curso de Control Automático.

# **CAPITULO 1**

## **1. MODULO DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR TRIFASICO**

### **1.1. Generalidades**

El módulo de control de velocidad desarrollado en este proyecto, es uno de los varios módulos que conforman el sistema de Plantas de Procesos Industriales del Laboratorio de Control Automático.

La finalidad del diseño y construcción de estas plantas es estudiar el comportamiento y los métodos de control utilizados en los procesos más comunes de la industria; así mismo, la incorporación de las nuevas tendencias tecnológicas como es el control de procesos mediante computadores.

El propósito principal, es el desarrollo y ajuste de controladores virtuales para los diferentes módulos o plantas creadas, los cuales se realizarán mediante software, en este caso MATLAB.

La aplicación de los módulos diseñados es básicamente para la realización de prácticas de laboratorio, dentro del curso Control Automático. Esto permitirá al estudiante familiarizarse con las teorías expuestas en clase.

Mientras se controla la planta o el módulo desde el computador mediante la programación de una interfase por diagramas de bloques, se puede monitorear el comportamiento del proceso en tiempo real.

Adicionalmente se presentan y describen los circuitos auxiliares empleados para el módulo de control de velocidad.

## 1.2. Descripción del Módulo de Control de Velocidad de un Motor Trifásico

El módulo que se muestra en la figura 1.2.1, está diseñado para que trabaje en un lazo realimentado, este sistema permite el control de la velocidad del motor trifásico manteniendo como estrategia la velocidad constante.

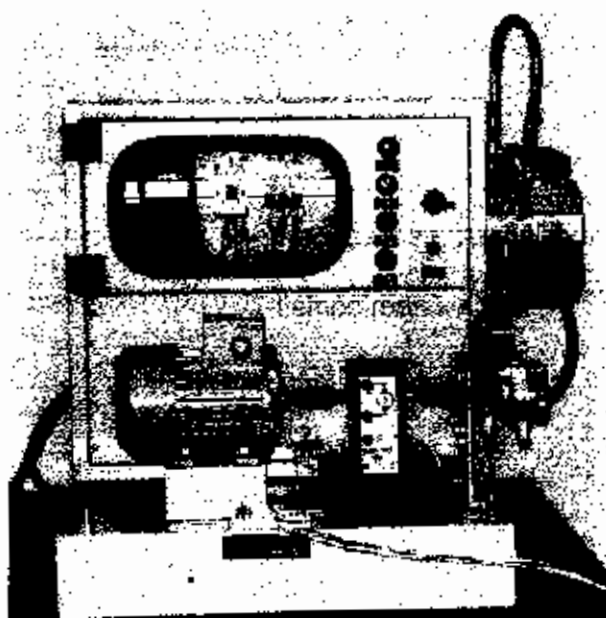


FIGURA 1.2.1 MÓDULO DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR TRIFÁSICO

El módulo permite realizar tres prácticas de laboratorio las cuales son: Determinación del Modelo Matemático usando el software Identificador de Sistemas (System Identification), El Ajuste de la

Respuesta del Sistema usando la herramienta SISO del Matlab, y Determinación de los Parámetros del controlador por el método de Ziegler-Nichols (ZN).

La figura 1.2.2 presenta el esquema del diseño empleado para el módulo de control de velocidad de un motor trifásico.

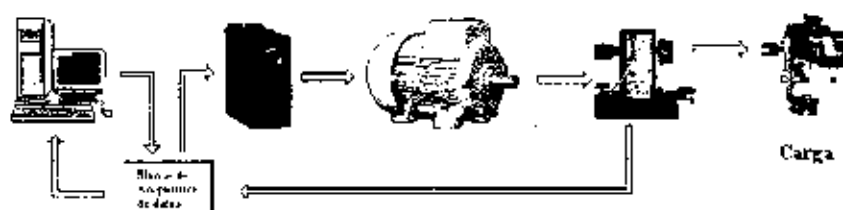


FIGURA 1.2.2 ESQUEMA DEL CONTROL DE VELOCIDAD

El módulo de control de velocidad de un motor trifásico consta de las siguientes partes:

- ✓ Un Motor Trifásico de Inducción tipo Jaula de ardilla (ver anexo 1)
- ✓ Un Variador de frecuencia Micromaster 420 (ver anexo 2)
- ✓ Un Panel de Programación Básico PPB (ver anexo 2).
- ✓ Un taco generador.
- ✓ Carga (Bomba hidráulica).

### 1.2.1 Funcionamiento del Control de Velocidad de un Motor Trifásico

El funcionamiento de este control, se basa en mantener constante la velocidad del motor trifásico figura 1.2.1.1 en la establecida previamente (set point), sin importar el tipo de valor de la carga o perturbaciones que puedan infringir en el mismo.

El motor va conectado a un variador de frecuencia, el mismo que puede ser controlado por una señal analógica de 0[v] a 10[v]. La señal será suministrada por la tarjeta de adquisición de datos, para variar la frecuencia de la señal de voltaje que se suministra al motor.

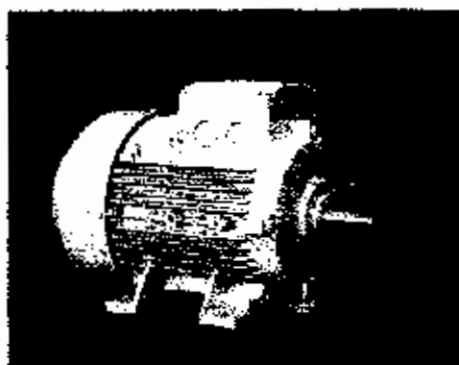


FIGURA 1.2.1.1 MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN



El variador de frecuencia será alimentado con una tensión 220 [V] trifásico, y operará mediante señales enviadas desde el controlador que será desarrollado en el software Matlab.

Para que la planta permanezca en la velocidad establecida por el set point, se utilizará un lazo de realimentación el cual estará comprendido por un tacogenerador.

El tacogenerador hará las veces de sensor, este no es más que un motor de dimensiones pequeñas de corriente continua, que al girar a las revoluciones del motor trifásico proporcionará en sus terminales una tensión proporcional a esa velocidad instantánea.

Para crear una perturbación en la planta se utiliza una bomba hidráulica de un sistema de dirección vehicular.

La bomba va acoplada al eje del tacogenerador, el sistema de red hidráulico consta de una llave de paso, que, al ser cerrada poco a poco obstruye el paso del aceite por la red, lo que hace que genere un torque de freno al motor

haciendo que disminuya su velocidad. Esta caída de velocidad debe ser corregida por la acción del controlador.

### 1.2.2 Características de un sistema de control

Todos los sistemas de control deben tener ciertas características en común como son: las de estabilidad, exactitud y rapidez de respuesta.

Los sistemas de control deben de reaccionar al cambio de señales de referencia y al efecto de las perturbaciones del sistema con una respuesta rápida, siempre teniendo en cuenta que debe buscar la aproximación al valor set point.

Lo importante dentro de un sistema de control es que la estabilidad del mismo se logre en el menor tiempo posible.

Esto es función de la estrategia de control que se adopte; es decir, puede realizarse el ajuste para aceptar una desviación de la señal de salida con relación a la referencia en un valor

preestablecido, ó se puede diseñar un sistema para que esa desviación de estado estacionario sea anulado.

### 1.3. Sensores y Actuadores

Se conoce como instrumentación a la técnica y equipos destinados a medir, visualizar, monitorear y controlar las operaciones de un proceso.

Todos los sistemas de control automático de un proceso tienen sus componentes principales, los cuales son el proceso en sí y el controlador.

El controlador tiene la responsabilidad de medir el valor de una variable del proceso, exhibirlo mediante algún instrumento y compararla con alguna magnitud de referencia y en caso de existir alguna desviación con respecto a esta, corregirla.

### 1.3.1. Descripción del sensor de velocidad

El sensor de velocidad que utilizaremos, es un equipo compuesto de un motor de corriente continua de imanes permanentes, acoplado con una banda al eje motriz interno y un potenciómetro lineal divisor de tensión de 10K $\Omega$  de donde se toma la señal de voltaje proporcional a la velocidad del eje motriz. Ver figura 1.3.1.1.

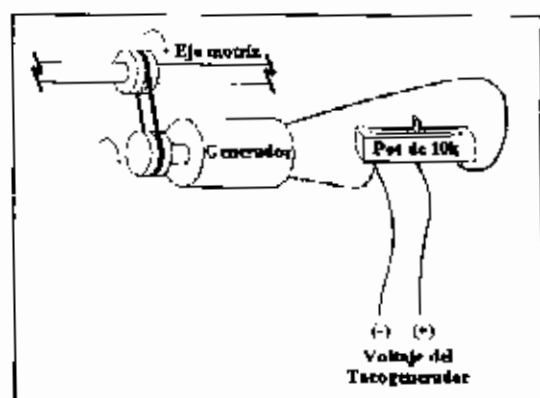


FIGURA 1.3.1.1 BOSQUEJO DE LOS COMPONENTES DEL TACOGENERADOR

El eje motriz atraviesa de lado a lado una estructura metálica, permitiendo así directamente la unión de un extremo de este con el eje del motor mediante un acople (matrimonio), el otro extremo es aprovechado para acoplar

la carga en este caso una bomba hidráulica, como se muestra en la figura 1.3.1.2.



FIGURA 1.3.1.2 SENSOR DE VELOCIDAD

Internamente este eje tiene una muesca, por donde pasa una banda que sirve de acople entre el, y, la polea que tiene el eje del motor de corriente continua que se encuentra fijado a la estructura metálica, como se puede apreciar en la figura 1.3.1.3.



FIGURA 1.3.1.3 CONEXIÓN INTERNA

Los terminales del motor de imanes permanentes están unidos al potenciómetro, el mismo que es ajustado a un valor de  $8.14K\Omega$  de resistencia, de esta manera se obtiene a la salida un voltaje de 5V con la velocidad máxima del motor trifásico.

El potenciómetro es ajustado a este valor debido a la facilidad que permite para la adquisición de datos.

En la programación de bloques del Simulink basta con colocar una ganancia amplificadora para obtener un voltaje de 10 voltios como máximo en la señal del tacogenerador.

### **1.3.2. Descripción del Variador de Frecuencia**

El variador de frecuencia a utilizarse es Micromaster 420 que se muestra en la figura 1.3.2.1, este tipo de actuador se alimenta con una tensión de 220 V trifásico.

Se escogió este tipo de actuador por la disponibilidad que existía del mismo en el mercado, y por las características

propias del proyecto ya que no era necesario un equipo de alto poder.



FIGURA 1.3.2.1 VARIADOR DE FRECUENCIA MICROMASTER 420

El convertidor de frecuencia esta controlado por microprocesadores y utilizan tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de última generación, un bosquejo es mostrado en la figura 1.3.2.2.

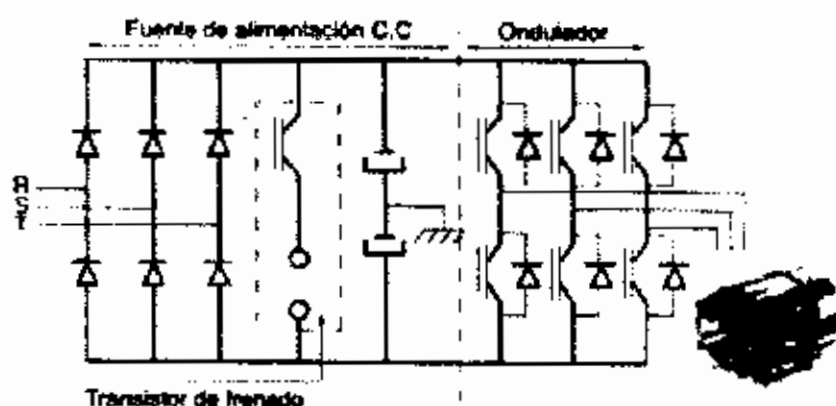


FIGURA 1.3.2.2 CIRCUITO DE FUERZA DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.

Esto lo hace fiable y versátil, un método especial de modulación por ancho de impulsos con frecuencia de pulsación seleccionable permite un funcionamiento silencioso del motor. Extensas funciones de resguardo ofrecen una protección excelente tanto del convertidor de frecuencia como del motor.

Debido al tipo de control propuesto para este proyecto, el variador de frecuencia se lo programa mediante el panel de programación básica (PPB) mostrado en la figura 1.3.2.3, para operar de manera analógica.

De esta manera el panel PPB se utiliza como interruptor de encendido y apagado del motor además de un visualizador de la frecuencia, corriente y voltaje de trabajo del motor.



FIGURA 1.3.2.3 PANEL DE PROGRAMACION BASICO



En el PPB se selecciona la opción de control por borneras o terminales y señalando por defecto consigna analógica, con lo cual estará listo para ser manipulado por el controlador desarrollado en Matlab.

#### **1.4. Circuitos Auxiliares de Control**

Para la ejecución del proceso se emplearon circuitos de control y fuerza que sirven para la activación y desactivación del módulo propiamente dicho.

El circuito de control es empleado para la activación del variador de frecuencia, este actuador una vez que se encuentra energizado, da paso al circuito de fuerza dejando listo al motor trifásico para que interactúen entre si y a su vez estos dos, con el computador.

##### **1.4.1 Circuito de Encendido y Apagado del Módulo de Control de Velocidad.**

Una vez estructurada la interfase tanto física como la de comunicación por software que serán desarrolladas en

capítulos posteriores, el siguiente paso para poner en funcionamiento el sistema controlador de velocidad es activar los circuitos de encendido de la planta de control de velocidad.

Para realizar esta acción es necesario conocer como es el funcionamiento, construcción, y manejo de este circuito y de la misma planta en si.

En la figura 1.4.1.1 se muestra el diseño eléctrico del funcionamiento de fuerza de la planta.

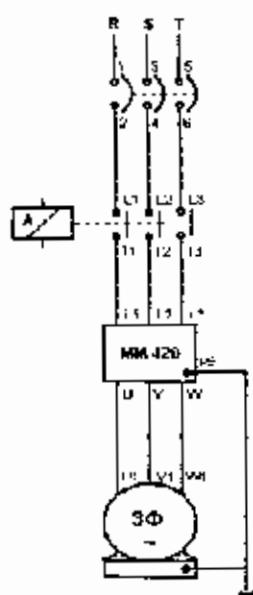


FIGURA 1.4.1.1 CIRCUITO DE FUERZA DEL MODULO DE CONTROL DE VELOCIDAD

Arriba se indicó primeramente que la planta tiene un circuito de encendido y apagado, el diagrama eléctrico de control del mismo se muestra en la figura 1.4.1.2.

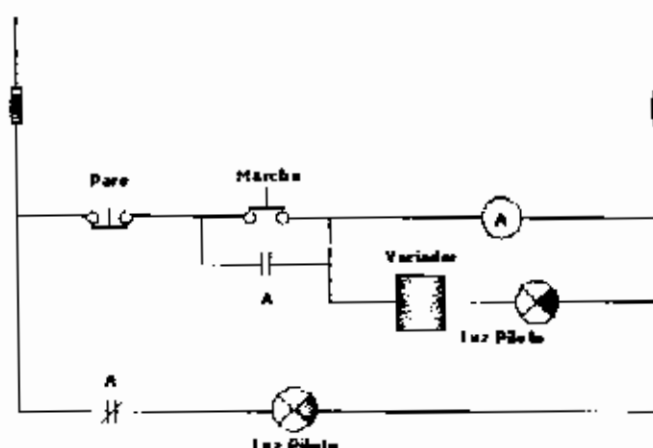


FIGURA 1.4.1.2. CIRCUITO ELECTRICO DE CONTROL

La secuencia de encendido de la planta es como se describe a continuación.

Para energizarla se procede a accionar el breaker trifásico, este mecanismo da paso al encendido de la luz piloto de paro (roja), para encender el módulo se pulsa la botonera de marcha que enciende la luz piloto del mismo nombre (verde).

Cuando se activa la botonera de marcha se energiza el contactor trifásico que se encuentra instalado en el módulo, este a su vez energiza al variador de frecuencia dejándolo listo para actuar con las señales del computador.

Para operar el motor trifásico se debe maniobrar el panel de programación del variador de frecuencia, en el panel existen dos botones principales que son el de apagado y encendido del motor, luego de presionar este último, el motor y el variador están listos para interactuar con el computador.

# CAPITULO 2

## 2. INTERFASE Y PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA CONTROLADOR DE VELOCIDAD EN SIMULINK.

En este capítulo, se describe el tipo de interfase que se utiliza para controlar la planta de control de velocidad de un motor trifásico, la misma que se realizará entre dos computadores el uno denominado *Computador Maestro* (Host) y el otro *Computador Remoto* (Target), este último va conectado directamente a la planta.

También se describen los pasos necesarios para realizar la conexión entre ambos computadores, conjuntamente con la programación en diagrama de bloques desarrollada para el control del sistema controlador de velocidad de un motor trifásico con el software *Matlab*.

## 2.1 Conexión y/o Comunicación entre Host-Target

Los protocolos de conexión y comunicación entre estos computadores pueden realizarse de dos formas: serial y mediante red. En este proyecto se trabajara con comunicación por red.

**Red.-** Los computadores son conectados mediante una red de cableado estructurado, esta puede ser LAN. Ambos PC's son conectados a la red con tarjetas adaptadas usando el protocolo de comunicación TCP/IP como se muestra en la figura 2.1.1.

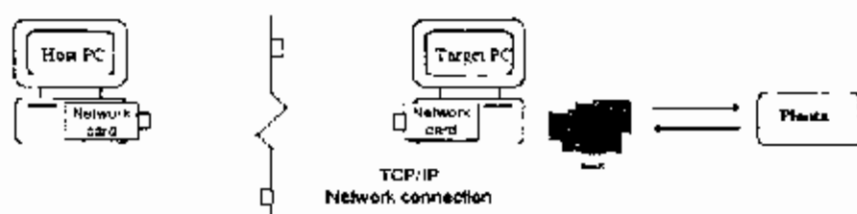


FIGURA 2.1.1. CONEXIÓN POR RED

Se utiliza este tipo de comunicación, por la facilidad que brinda al operador de comunicarse desde cualquier lugar con solo acceder a una red y conocer el IP del Target.

Con la red, el Target PC puede usar una tarjeta que soporte este tipo de comunicación y la tasa de transferencia puede ser de 10 o 100 megabits/segundo. Mayores detalles para realizar la comunicación entre estos equipos se expresarán en el Anexo 4.

En el sistema controlador de velocidad de un motor trifásico debido al tipo de comunicación que se escoge, se ingresa el puerto de identificación y se crea un disquete de arranque (Boot disk) en el xpc-setup del software Matlab. Ver anexo 4.

Utilizando el disquete de arranque se reinicia el Target PC, quedando de esta manera listo para la ejecución del sistema de control construido en Simulink.



## 2.2 Interfase y programación en Simulink

La herramienta Simulink del software Matlab, provee un ambiente de programación gráfico y de diagramas de bloques con todas las herramientas necesarias para la adquisición, análisis y presentación de datos.

Después de crear el programa con diagrama de bloques, Simulink construye el proceso para generar código C, Compilar, comunicar y descargar la aplicación al *Computador Target*.

El programa integra la adquisición, el análisis y la presentación de los datos en un solo sistema.

### **2.2.1 Descripción de la programación en Simulink**

Los programas en Simulink son llamados instrumentos virtuales, constan de diagramas de bloques, elementos visualizadores y de adquisición de datos.

Los bloques que se construyen son una representación de los nodos del programa, por ejemplo funciones aritméticas, ecuaciones, etc.

Los componentes se conectan para definir el flujo de los datos dentro del programa de bloques.



La figura 2.2.1.1 muestra la red de librerías de Simulink que se emplean en este sistema controlador, entre las más utilizadas se encuentran Simulink y Xpc Target.

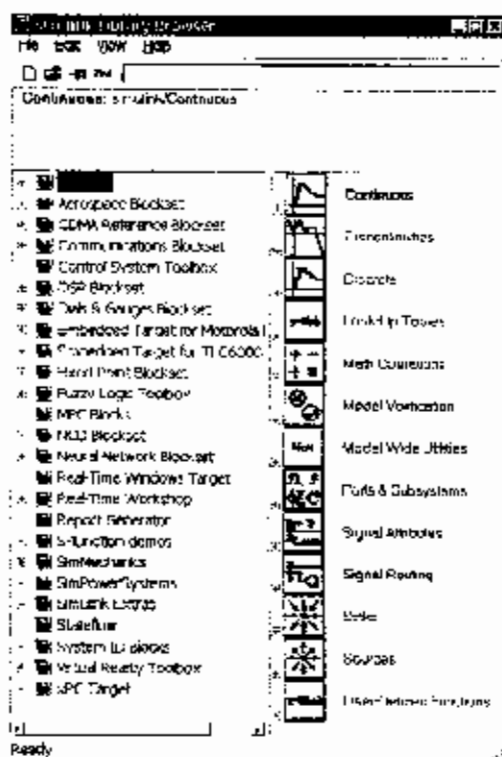


FIGURA 2.2.1.1 LIBRERÍAS DE SIMULINK

Para visualizar las sub-librerías, presione dos veces el botón izquierdo del mouse en el icono o nombre de la librería, y, para revisar el contenido de las mismas solo presione una vez.

### ***Programación en Lazo Abierto***

Se seleccionan cierta cantidad de iconos o bloques de las sub-librerías para realizar la programación de lazo abierto, los cuales son:

- *Escala Deslizable (Scaled Slider)* en la sub librería Deslizables correspondiente a la librería Escalas y Galgas.
- *Función de transferencia (Transfer Fcn)* en la sub librería Continuos que corresponde a la librería Simulink.
- *Ganancia (Gain)* en la sub librería Operaciones Matemáticas de la librería Simulink.
- *Entrada Analógica (Analog Input PCI 6024E)* de la sub librería A/D correspondiente a la librería XPC Target.
- *Salida Analógica (Analog Output PCI 6024E)* en la sub librería D/A que se encuentra en la librería XPC Target.

- *Osciloscopio de XPC Target (Scope XPC)* de la sub-librería Misc. que corresponde a la librería XPC Target.

Para separar los iconos seleccionados, se procede a arrastrar cada bloque hasta a una nueva plantilla de modelo.

Luego de haber logrado esta operación se realiza las conexiones entre los bloques seleccionados, en la figura 2.2.1.2 se muestra el modelo concluido, que será utilizado para realizar pruebas

El modelo que se aprecia en la siguiente figura se encuentra conectado en forma de lazo abierto, esto se debe a que es necesario ajustar cada una de las ganancias hasta obtener los resultados deseados.

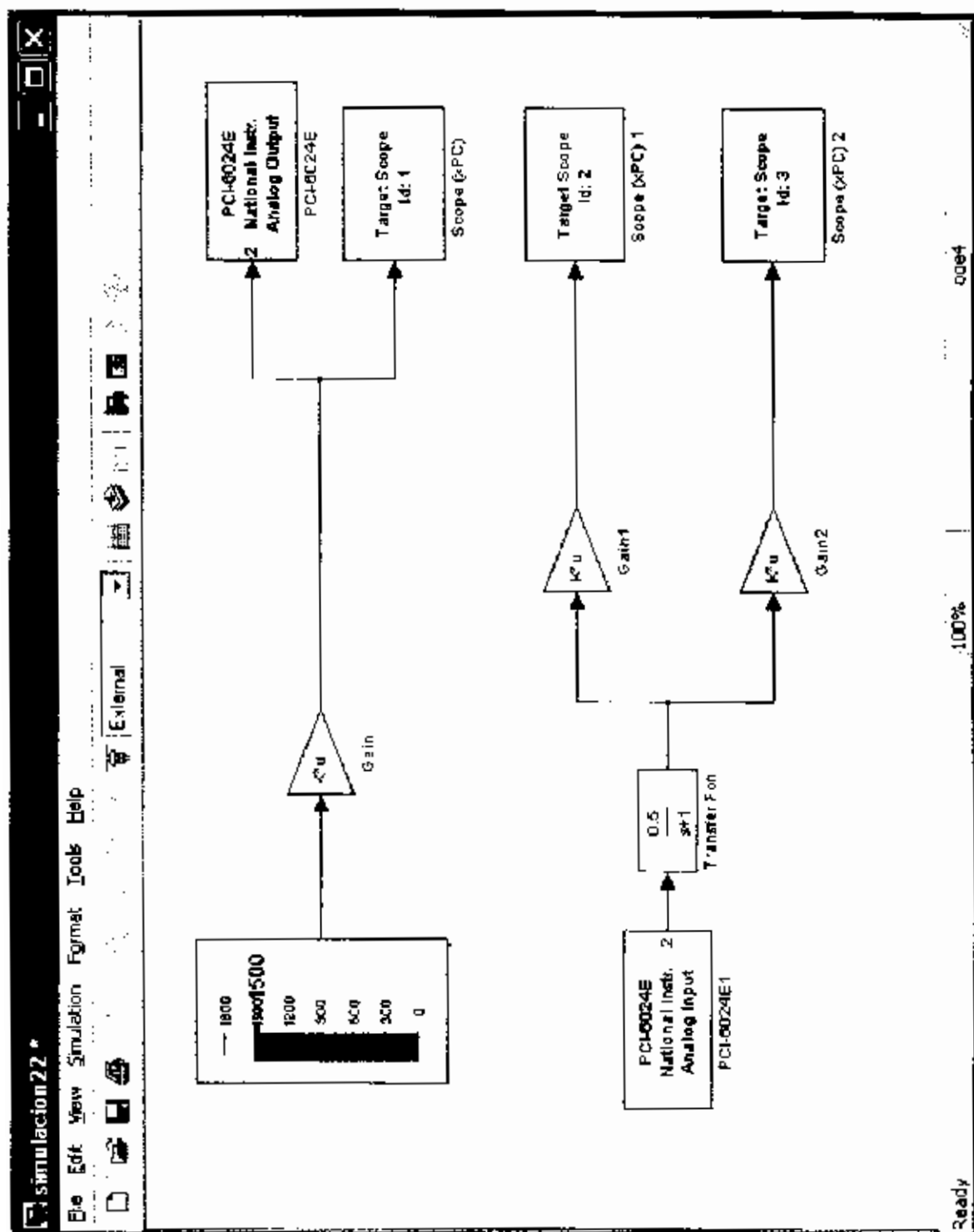


FIGURA 2.2.1.2. MODELO DE PROGRAMACIÓN DE BLOQUES EN LAZO ABIERTO

### Programación en Lazo Cerrado

La selección de bloques que se realizó en los pasos anteriores, es la base que se necesita para comenzar a construir el lazo cerrado.

Teniendo en cuenta la forma clásica que se emplea para un sistema con retroalimentación como se muestra en la figura 2.2.1.3, se parte de ello para lograr la programación en lazo cerrado.

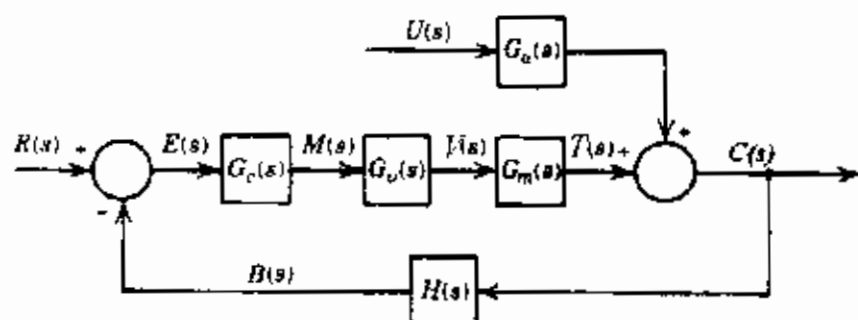


FIGURA 2.2.1.3 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA TÍPICO CON REALIMENTACIÓN

Donde.

$R(s)$  Transformada de Laplace de la señal de referencia,

0[v] a 10[v] dc.



CIB-ESPOL

$C(s)$  Señal de salida. Velocidad 0 a 1800 rpm.

$M(s)$  Señal actuante. Transformada de Laplace de la señal de salida del controlador, 0[v] a 10[v] dc.

$V(s)$  Señal actuante. Transformada de Laplace de la señal de salida del variador de frecuencia, 0[v] a 220[v].

$T(s)$  Señal actuante. Transformada de Laplace de la señal de torque del motor trifásico.

$B(s)$  Señal de realimentación Transformada de Laplace de la señal de salida del transmisor.

$E(s)$  Señal del error actuante. Transformada de Laplace de la señal de error.

$U(s)$  Transformada de Laplace de la señal de perturbación

$G_c(s)$  Función de transferencia del controlador del sistema.

$G_v(s)$  Función de transferencia del variador de frecuencia

$G_m(s)$  Función de transferencia del proceso entre la variable controlada y la variable manipulada

$G_U(s)$  Función de transferencia de la bomba de dirección hidráulica en la perturbación

$H(s)$  Función de transferencia del sensor.

Para conseguir el correcto control del diseño se seleccionan ciertos bloques de las librerías de Simulink, y se los añaden a la programación realizada en lazo abierto. Estos bloques son los siguientes:



- *Paso Unitario (Step)* De la sub librería Fuentes
- *Switch Manual (Manual Switch)* Este elemento se lo encuentra en la sub librería Direccionando Señales
- *Suma (Sum)* Este bloque pertenece a la sub librería Operaciones Matemáticas

Los bloques que se escogen para esta nueva programación pertenecen a la librería Simulink.

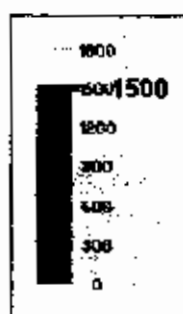
### **2.2.1.1 Definición y Parametrización de Bloques y/o Iconos**

La programación por diagramas de bloques realizada en Simulink, tiende a sufrir muchos cambios pese a encontrarse constituido por bloques y/o iconos específicos.

Esto es debido a los parámetros con los que se ajustan cada uno de los elementos que lo componen.

Para evitar este tipo de errores en el sistema controlador, se necesita tener conocimiento previo del funcionamiento dinámico de la planta, y, esa noción aplicarla directamente a los parámetros del modelo.

A continuación, se revisa los parámetros internos y la utilización de cada uno de los bloques que constituyen el modelo de programación, empleado para este sistema controlador de velocidad.



**Escala Deslizable (Scaled Slider).**- Este bloque nos permite ajustar la señal de referencia que se traduce en el valor de velocidad deseada para el motor.



Al cambiar el valor de la señal de referencia se envía al controlador la información necesaria para que realice el cambio necesario para obtener el nuevo valor de velocidad deseado.

Este bloque fue seleccionado por la facilidad de manejo que brinda al operador de la planta, a demás de ser vistoso y amigable.

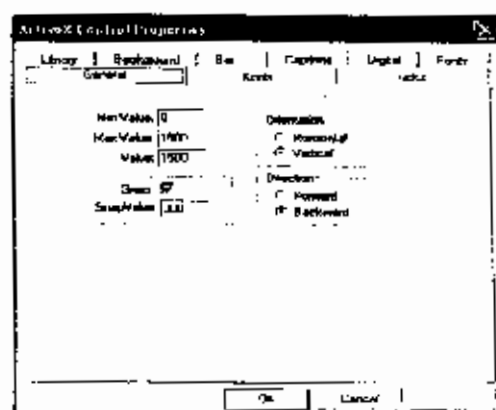
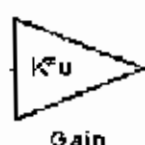


FIGURA 2.2.1.1.1 CUADRO DE PARÁMETROS DEL AJUSTE

Este bloque lleva por nombre Ajuste, en la figura 2.2.1.1.1 se ingresan los parámetros de la escala estos son valor mínimo, máximo y el paso en que se incrementa la escala.



**Ganancia (Gain).**- El bloque sirve para acondicionar la señal de entrada al voltaje proporcional del mismo, es decir, la señal que emite el ajuste se aplica a esta ganancia produciendo un cambio a voltaje.

El bloque de ganancia, fue seleccionado por la forma de acoplarse a las necesidades requeridas, bajo las diversas pruebas que se efectuaron, en la figura 2.2.1.1.2 muestra el cuadro de parámetros correspondiente a este bloque.

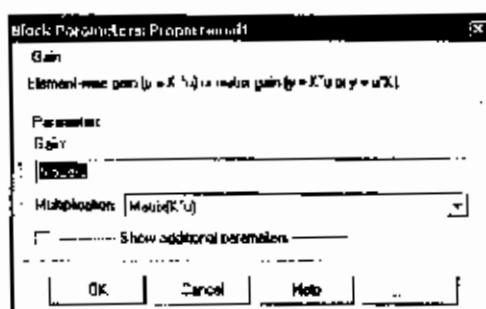


FIGURA 2.2.1.1.2 CUADRO DE PARÁMETROS DE SEÑAL DE AJUSTE.

Se denomina Señal de Ajuste, debido que al multiplicar las revoluciones por minuto (RPM) que emite el ajuste por este valor se produce

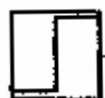


CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

una conversión a voltios, el valor de este bloque es de  $5.52e-3$  V/RPM.



**Paso Unitario (Step).**- Este bloque genera una señal escalón, el cual puede ser ajustado al valor de nivel de escalón que se desee.

En la figura 2.2.1.1.3 se puede apreciar el cuadro de parámetros del bloque, en el se ingresarán el valor de inicio, valor final, el tiempo de muestreo.

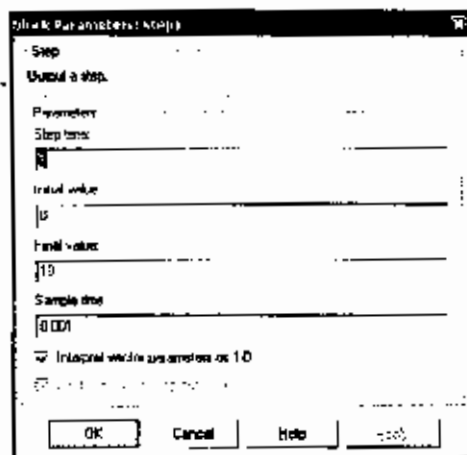
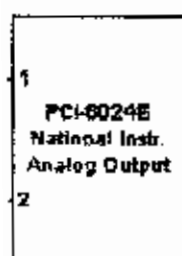


FIGURA 2.2.1.1.3 CUADRO DE PARÁMETROS DE ALIMENTACIÓN AL SET POINT

El valor final es 10 debido a que la alimentación con la que se trabaja es de 0 - 10 [V], y la frecuencia de muestreo es de 10 mHz, este valor es seleccionado de acuerdo a la cantidad de datos que se desea presentar en el osciloscopio virtual.



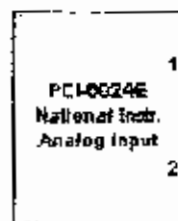
#### Salida Análoga (PCI 6024E).-

Este bloque permite la comunicación con la tarjeta ubicada en el computador target.

FIGURA 2.2.1.1.4 CUADRO DE PARÁMETROS DE ALIMENTACIÓN AL SET POINT Y VOLTAJE AL VARIADOR

En el cuadro de diálogo mostrado en la figura 2.2.1.1.4, se selecciona el canal de salida de la señal, el tiempo de muestreo de los datos y valores de condiciones iniciales.

Se a denominado Alimentación al Set Point y Voltaje al Variador, porque es un voltaje que envía la fuente de paso unitario, y además el voltaje proporcional que el ajuste envía al variador a través de él.



#### **Entrada Análoga (PCI 6024E).-**

Este bloque adquiere las señales que son enviadas desde la planta a través de la tarjeta de

adquisición de datos ubicada en el computador target.

En este caso las señales son del tacogenerador y la de referencia o set point.

En la figura 2.2.1.1.5 se aprecian los parámetros necesarios que se deben ingresar para adquirir las señales.

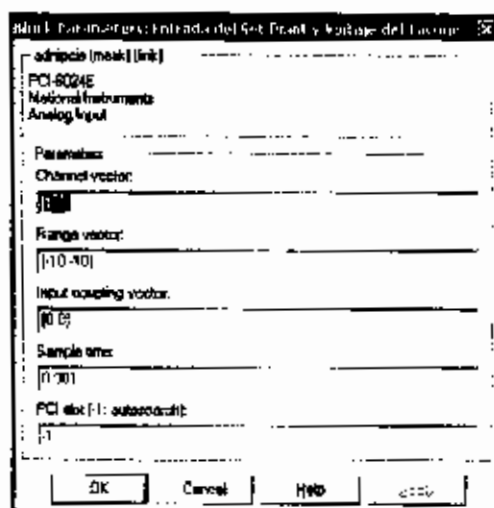


FIGURA 2.2.1.1.5 CUADRO DE PARÁMETROS DE ENTRADA DEL SET POINT Y VOLTAJE DEL TACOGENERADOR

Al igual que en el bloque de salida, se ingresan los canales, los rangos de voltaje que son de 10 [V] como máximo y el tiempo de muestreo.

Este bloque toma el nombre de Entrada del Set Point y Voltaje del Tacogenerador debido a que esas son las señales que ingresan.

$$\frac{0.5}{s+1}$$

**Función de Transferencia (Transfer Fcn).**- El bloque es

utilizado como un filtro pasa bajos utilizado para suavizar la señal que ingresa del tacogenerador; es decir, eliminar la mayor cantidad de ruido que tiene esta señal.

En la figura 2.2.1.1.6 se presenta el cuadro de dialogo del bloque función de transferencia este toma el nombre de filtro, los parámetros se los ingresa en forma de polinomios tanto para el numerador como para el denominador.

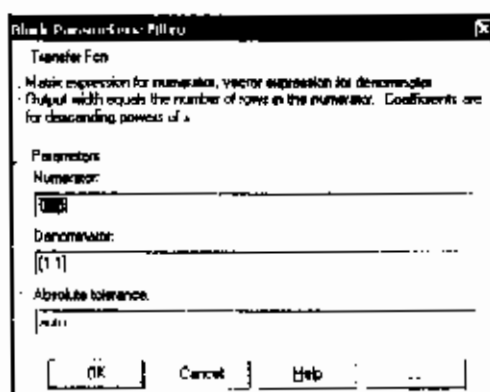
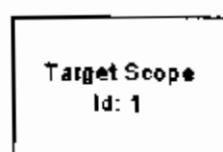


FIGURA 2.2.1.1.6 CUADRO DE PARÁMETROS DEL FILTRO



### Osciloscopio XPC Target

(Scope XPC).- El osciloscopio

virtual creado en el

computador Remoto, muestra los datos de las

señales tanto de entrada como de salida, en

este caso particular presentará el error que se

proporcione entre la variable deseada y la

medida.

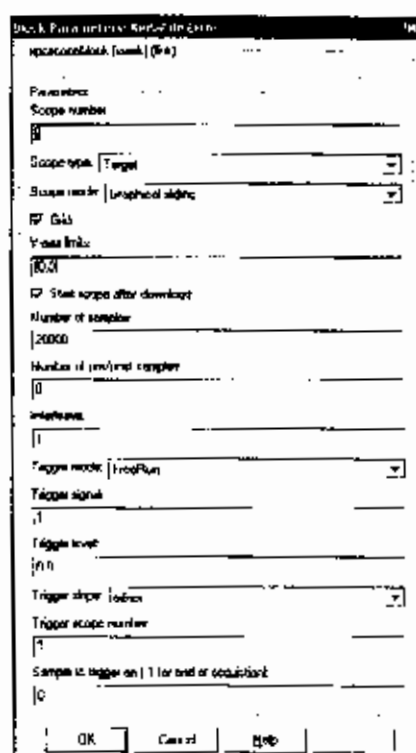


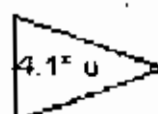
FIGURA 2.2.1.1.7 CUADRO DE PARAMETROS DEL ERROR.



En el cuadro de dialogo como muestra la figura 2.2.1.1.7 se establece el número del osciloscopio, el tipo de osciloscopio, el modo de muestreo y la cantidad de datos muestreados.

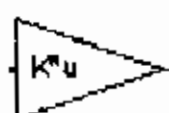
En el modelo creado en lazo abierto, existen 3 osciloscopios XPC Target y 3 bloques de ganancia como se presentó en la figura 2.2.1.2.

Los cuadros de parámetros de cada uno de ellos no difieren mucho de los anteriormente descritos, debido a esto solo se los nombrará e indicará la función que desempeñe y el parámetro que tenga mayor importancia.



**Ganancia 1 (Gain 1).**- El voltaje que emite el tacogenerador se aplica a este bloque de ganancia para acondicionar la señal de entrada a un voltaje proporcional al del Set Point, es decir entre 0-10V,

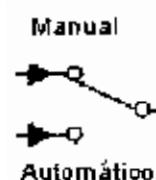
Por esta razón el bloque toma el nombre de Ganancia de Voltaje y su valor es de 4.1. La señal que se envía desde esta ganancia se resta con la que es proporcionada por el set point, y su visualización es presentada en el osciloscopio de la señal de error actuante



. **Ganancia 2 (Gain 2).**- El voltaje

que emite el tacogenerador se aplica al bloque de ganancia, al igual que en la ganancia anterior, pero esta vez su función es convertir la señal de voltaje a velocidad en RPM.

El nombre que toma este bloque es de Ganancia de velocidad debido a la función que cumple, su valor es 730.5 RPM/V.



**Switch Manual (Manual Switch).**-

Este elemento es utilizado para cambiar de lazo abierto a lazo

cerrado, es decir pasar de control manual a control automático. Con ello la planta se controlará con el set point localizado en el mismo módulo, la finalidad es tener control completo de la planta por medio del controlador que será desarrollado en capítulos posteriores.

Una vez realizado todos los ajustes de parámetros y nombres de cada bloque que se mostró en la figura 2.2.1.2 adicionando los necesarios para el control en lazo cerrado el modelo creado en un principio cambia, pues las señales que se manejan dentro de esta programación de bloques toma nombres concretos, o sea, se definen e identifican, dejando un nuevo modelo que se muestra en la figura 2.2.1.1.8.

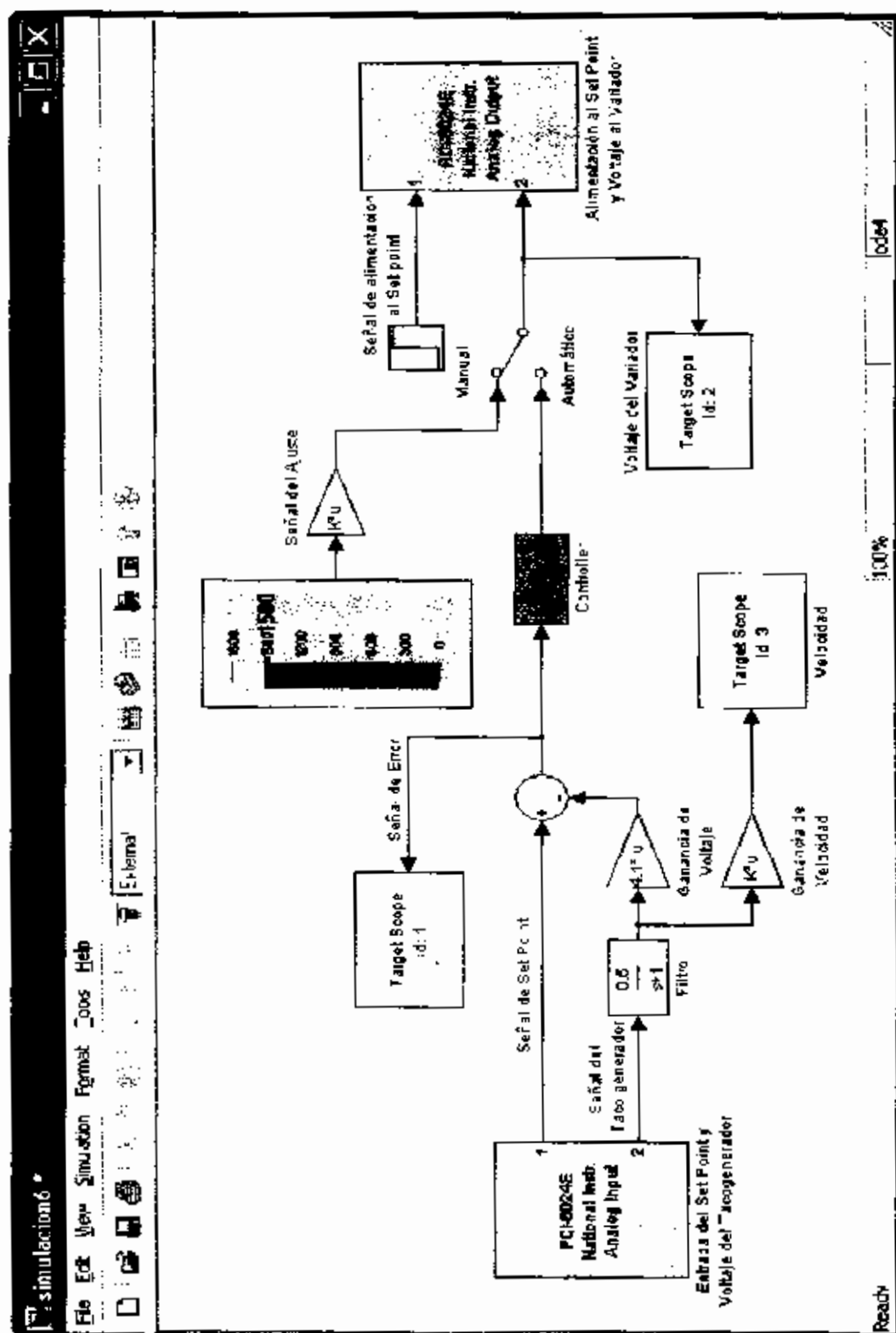


FIGURA 2.2.1.1.8 MODELO DE PROGRAMACION DE BLOQUES FINAL

# CAPITULO 3



## 3. ADQUISICIÓN DE DATOS Y CREACIÓN DEL MODELO DINÁMICO DEL SISTEMA CONTROLADOR DE VELOCIDAD.

En capítulos anteriores se describió los diversos elementos o equipos que componen la planta, los mismos que se emplearan para realizar el control de velocidad, además de la interfase de conexión que se realiza para efectuar el control de estos, cada uno de los elementos tienen una representación tanto simbólica como matemática dentro de cada programa que se emplee.

En el presente capítulo, se tratara sobre la adquisición de datos con ayuda del software Matlab; y, el uso de los mismos para determinar el modelo matemático de la planta con la ayuda del Identificador de Sistemas (System Identification) que es una herramienta del mismo programa.

### 3.1. Equipos de Adquisición de Datos.

Para la interfase física de comunicación entre la planta de procesos y el Computador Remoto, se utiliza una tarjeta de adquisiciones de datos de National Instruments.

Esta tarjeta deberá estar instalada en el target como se muestra en la figura 3.1.1, pues este será el computador que adquirirá los datos en tiempo real con la ayuda del programa Kernel y XPCTarget desarrollados por Mathworks.



FIGURA 3.1.1 INSTALACION DE TARJETA PCI 6024E

Para facilidad del operador al realizar la adquisición de datos con la tarjeta PCI 6024E, se utilizará un bloque de adquisiciones CB-68LP, ambos son equipos National Instruments (Ver Anexo 3).

De preferencia y para evitar el ingreso de señales no deseadas (ruidos), es preferible usar un cable apantallado, de esta manera se asegura una transmisión de datos muy próximos a la realidad.

Una vez realizado la interfase física entre el módulo de trabajo y el Computador Remoto, resta elaborar en Simulink la programación necesaria para poder adquirir los datos y guardarlos como un arreglo de matrices, para su posterior utilización en el Identificador de Sistemas.

### **3.2. Configuración del Sistema en Simulink**

En el capítulo anterior se estableció la programación de bloques que se utilizará en Simulink para lograr el control del módulo de velocidad.

La programación desarrollada previamente en el capítulo 2, constituye parte de la planta ya que suministra y distribuye las señales del módulo.

De igual forma el sistema contribuye con retardos en cada acción que se ejecuta dentro del mismo, los mismos que son despreciables. La suma de todos estos estados de transición, los ruidos propios del módulo y la interfase, son lo que distinguen la dinámica de cada planta.

Al efectuar la adquisición de los datos en tiempo real, se tiene por objetivo recolectar toda esta información mediante un formato numérico y archivarlos en un arreglo de matrices, para luego ser importados a los diferentes programas para su análisis.



CIB-ESPOL

Para la adquisición de datos, se utilizan los elementos de Simulink denominados Bloques de Salida (Output) en la programación de Simulink, estos bloques se agregan al transcurso o flujo de la señal que se desea capturar.



CIB-ESPOL

En este caso se adquirirá las señales de entrada y salida de la planta como lo muestra la figura 3.2.1. Para realizar esta acción, se debe mantener la planta en el punto de operación y en lazo abierto, ya que de este modo se obtendrá la dinámica propia de la misma a las diferentes señales perturbadoras que se apliquen.



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL



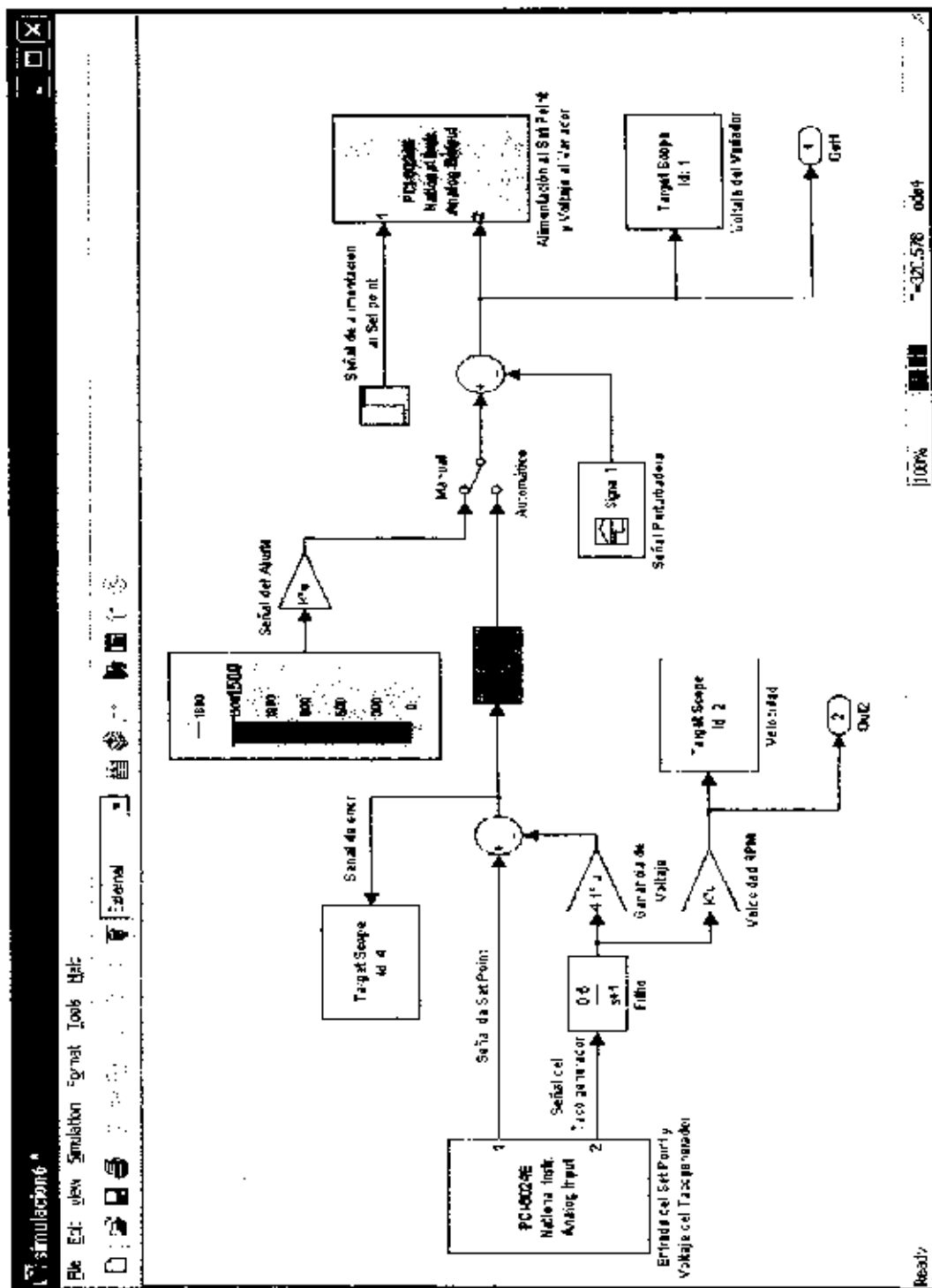


FIGURA 3.2.1 PROGRAMACION PARA ADQUISICION DE DATOS

El punto de operación de la planta se ubica en 1500 RPM, la señal de prueba que se añade al sistema por medio de un Bloque Signal Builder de la sub librería Source de Simulink, tiene la forma que se muestra en la figura 3.2.2.

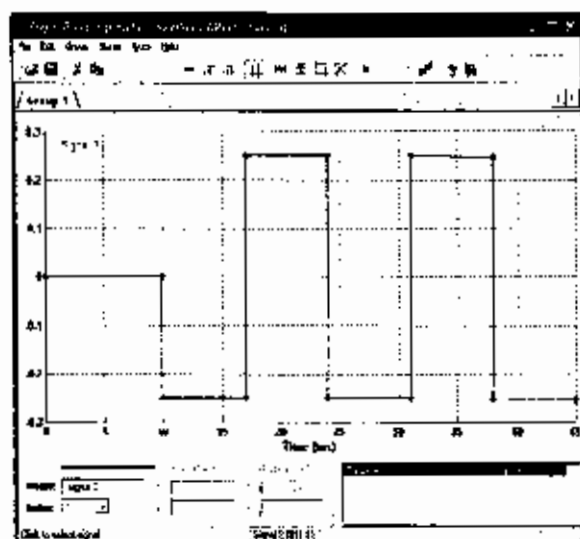


FIGURA 3.2.2 SEÑAL DE PRUEBA

En la gráfica anterior se aprecia un nivel constante de 0 V. durante 10 s, esta acción se realiza debido a que es necesaria la estabilidad del sistema en el set point antes de ingresar la señal de prueba a la planta.

Transcurrido este tiempo la señal cambia su forma a una onda en forma de tren de pulsos durante 35 s., cada pulso tendrá una amplitud de 0.25 V. y una periodo de 14 s. el objetivo de este

cambio, es capturar la dinámica de la respuesta de la planta que se efectúa a los diferentes cambios que se administran a la entrada del sistema.

Estos tiempos y valores de voltaje fueron seleccionados de acuerdo al comportamiento de la planta, es decir, el tiempo que esta tarda en estabilizarse en un punto determinado de trabajo.

### **3.2.1. Configuración de los Parámetros de Simulación del Sistema**

Para poder iniciar la simulación en Modo Externo, en la programación de bloques construida en Simulink, se debe realizar algunos procedimientos, como principal, la configuración de parámetros del sistema en Simulink.

En el menú de simulación del modelo de programación escoja parámetros de simulación, esto abrirá el cuadro de dialogo del mismo nombre que se muestra en la figura 3.2.1.1.

En este cuadro de diálogo, se procederá a ingresar todos los parámetros para iniciar la ejecución de la programación realizada en Simulink.

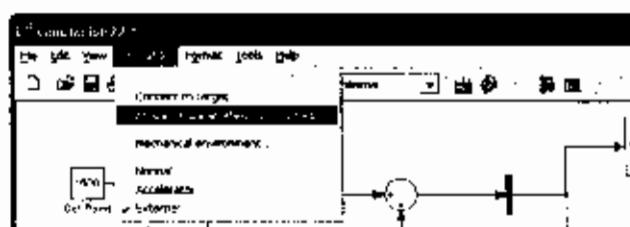


FIGURA 3.2.1.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS

Una vez abierto el cuadro de diálogo que se presenta en la figura 3.2.1.2, en la opción "Solver" seleccione los parámetros que se visualizan en la figura.

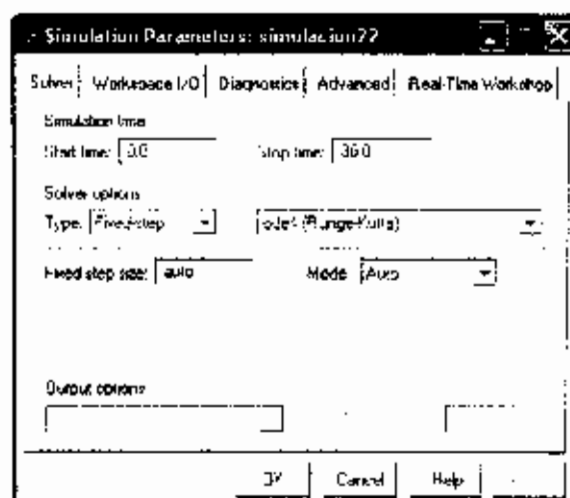


FIGURA 3.2.1.2 PARAMETROS DE SIMULACIÓN SOLVER

El tiempo de parada de la simulación es de 45 s tiempo suficiente para poder capturar los datos que presente el sistema con la señal de prueba, el tipo de solucionador ode4 (Runge-Kutta) es el tipo apropiado de programa para evaluar los datos que se ingresen del sistema continuo,

El paso de muestreo, en este caso Fixed-step, es la forma en la que se evaluarán los modelos continuos y el modo automático que es usado para bloques que tengan diferentes valores de transición.

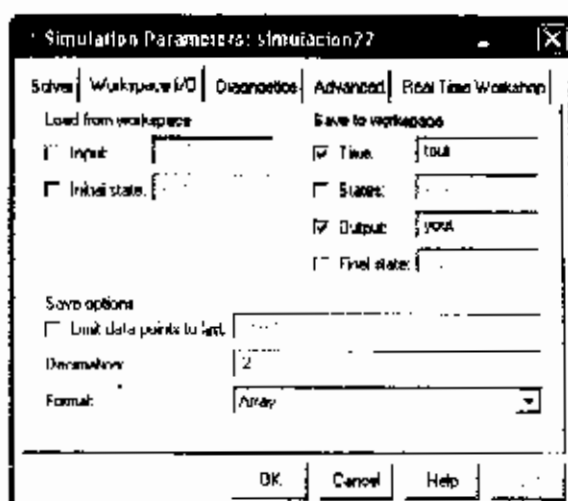


FIGURA 3.2.1.3 PARAMETROS DE SIMULACIÓN WORKSPACE I/O

En la opción "I/O Workspace", se seleccionan las casillas que se presentan en la figura 3.2.1.3, con el fin de adquirir los

datos de la planta y guardarlos en la forma deseada. Estas opciones se escogen con la finalidad de almacenar en una matriz los datos de la curva de reacción de la planta.

Luego en la opción "Real-Time Workshop" se selecciona las opciones que pertenezcan a la configuración target, como se presenta en la figura 3.2.1.4.

Esto se realiza por que se va a trabajar con el target y con elementos del Xpctarget y son necesarios para que se ejecute la simulación.

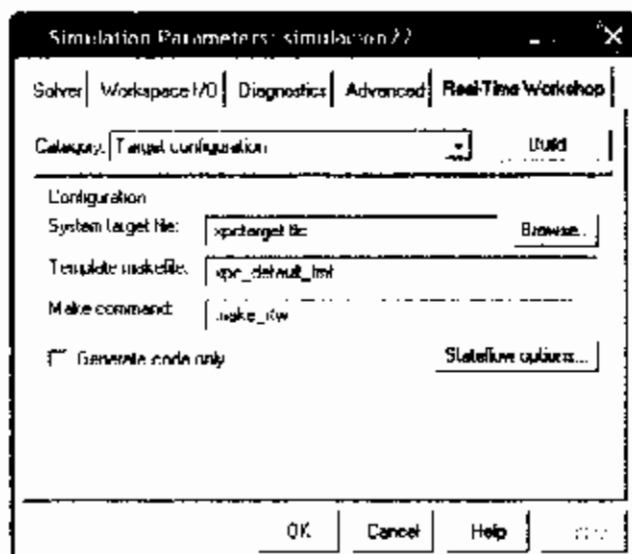


FIGURA 3.2.1.4 PARAMETROS DE SIMULACIÓN REAL-TIME WORKSHOP.

### 3.2.2 Ejecución de la Programación y Recuperación de los datos

Una vez seleccionado los parámetros se procede a construir la codificación y descargar la aplicación en el Target PC, es necesario haber realizado previamente el disco de arranque, mayor información sobre esto se puede ver en el Anexo 4.

El siguiente paso es iniciar la ejecución del programa, para ello se digita la siguiente instrucción desde la ventana de comandos del Matlab:

```
>>xpcrcfcool
```

Este comando abre el cuadro de control remoto del XPC Target como se aprecia en la figura 3.2.2.1,

En esta ventana se especifica el tiempo de muestreo y de parada de la simulación; presionando play se inicia la ejecución de la simulación.

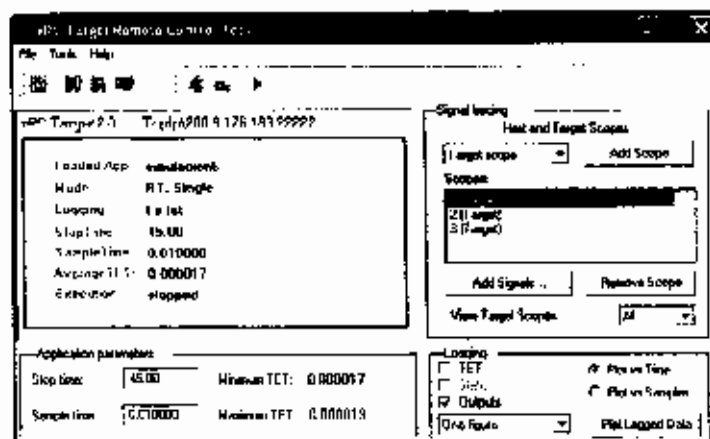


FIGURA 3.2.2.1 CONTROL REMOTO XPC TARGET

Como se trabaja con señales externas y se utiliza la comunicación Host-Target, la información de los datos del sistema se almacenan en la memoria seleccionada automáticamente para el uso del computador Target.

Desde la ventana de comandos del Matlab mediante la ejecución de instrucciones, se accede a estos datos para proceder a visualizarlos en graficas independientes como muestran en las siguientes figuras 3.2.2.2 y 3.2.2.3.

```
>> plot(tg.timelog, tg.output.log)
```



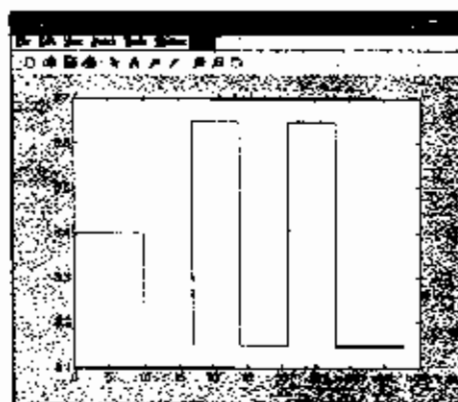


FIGURA 3.2.2.2 SEÑAL DE ENTRADA AL SISTEMA

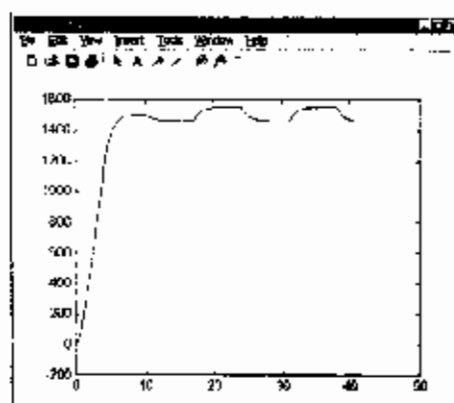


FIGURA 3.2.2.3 SEÑAL DE SALIDA DEL SISTEMA

Para guardar los datos en arreglos matriciales al Workspace se seleccionan nombres para cada señal adquirida, y, con ayuda de los siguientes comandos se importan los datos, al mismo tiempo que se selecciona la cantidad necesaria de estos para trabajo o análisis.

```
>> wm = tg.output1.log;
```

```
>> wm = wm(800:4801);
```

Con la primera instrucción, capturamos los datos almacenándolos en `wm`, este es solo el nombre de una variable seleccionada por el operador y esta sujeta a cambios.

En la segunda instrucción, eliminamos los 800 primeros datos de una totalidad de 4801, esta acción se la realiza con el fin de eliminar la parte transitoria de la planta hasta llegar a la estabilidad, pues es necesario tomar los datos a partir de que se ingresa la señal de prueba.

El fin de este método es conocer la dinámica de la planta en el punto de operación cuando es inquietada por una señal externa.

### **3.3. Utilización de la Herramienta de Trabajo de Matlab “Identificador de Sistemas (System Identifications)”.**

El modelo matemático sirve para encontrar los parámetros del controlador con las restricciones que se crean necesarias sin necesidad de utilizar la planta.

El funcionamiento del variador de frecuencia y el motor trifásico en conjunto, se comportan como un motor DC, con lo cual el sistema tendría un modelo matemático de primer orden, o sea de la siguiente forma:

$$I(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

En esta parte del capítulo con la ayuda de las herramientas del Matlab, se demostrara si es real la afirmación que se ha propuesto.

Al ingresar los datos al Matlab en forma matricial estos quedan registrados en el Workspace, es importante que los datos se encuentren en este espacio ya que el Identificador de Sistemas importa los datos desde este sitio.

El Identificador de Sistemas es una herramienta que se utiliza para construir modelos matemáticos aproximados de plantas o procesos reales, basándose en la adquisición de datos de los mismos.

Al seleccionar el programa de las herramientas de Matlab abre una ventana sin título como se muestra en la figura 3.3.1, esta permite

realizar la importación y el tratado de los datos en el campo o espacio data, al igual que la selección de modelos en el campo o espacio del mismo nombre.

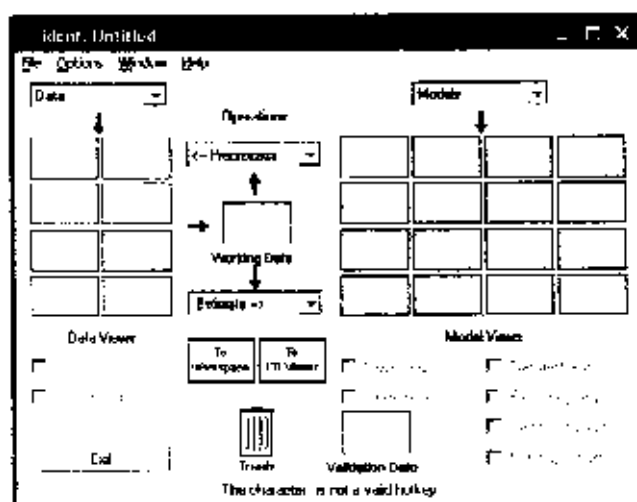


FIGURA 3.3.1 VENTANA DEL IDENTIFICADOR DE SISTEMAS

### 3.3.1. Descripción de Pizarras de Datos

Para cargar los datos adquiridos de la planta hacia el Identificador de Sistemas, se despliega el menú Datos y se selecciona la opción Importar, esto abre el cuadro de dialogo del mismo nombre que permite ingresar los datos que se encuentran en forma matricial en el "Workspace".

Los nombres que se escogieron para cada uno de los archivos de datos, proporcionales a la entrada y salida de la planta, como son "mg" y "wm" respectivamente, son llenados en los campos que corresponden a las variables del sistema.

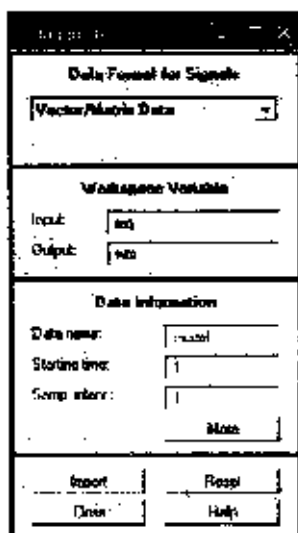


FIGURA 3.3.1.1 CUADRO DE DIALOGO IMPORTAR DATOS

Adicionalmente se ingresa el nombre que se asignará a esta sesión de datos como es "mydata"; en la figura 3.3.1.1 se puede apreciar el cuadro de dialogo importar datos.

Después de tener los campos de información llenos se presiona importar; en las pizarras de datos aparece la

primera gráfica; esta, representa los datos que se han importado desde el "Workspace" del Matlab.

Esta primera pizarra lleva el nombre que se ingresó en el cuadro de dialogo Importar; la información se puede apreciar en forma representativa seleccionando la opción Grafico de Tiempo (time plot), como lo demuestra la figura 3.3.1.2.

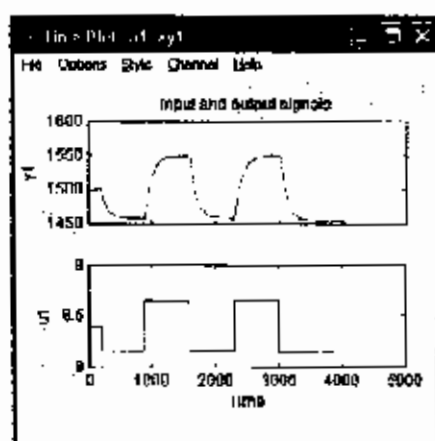


FIGURA 3.3.1.2 REPRESENTACION GRAFICA DE DATOS

La segunda pizarra, contiene datos de la gráfica anterior después de que han sido eliminados los niveles constantes innecesarios, para ello se selecciona la opción eliminación de constantes (remove means) del menú desplegable pre-procesos.

Al igual que la pizarra anterior esta lleva el nombre que se selecciono adicionado la letra d; en la figura 3.3.1.3 se aprecia la diferencia que existe en los datos antes y después de eliminar los niveles constantes.

Cada gráfica tiene un color representativo, que ayuda a diferenciarlas cuando son bosquejadas todas al mismo tiempo en una sola figura.

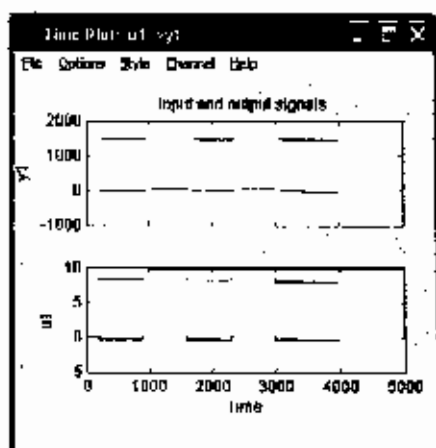


FIGURA 3.3.1.3 REPRESENTACION DE DATOS CON Y SIN ELIMINACION DE NIVELES CONSTANTES

Como paso siguiente, se selecciona la cantidad necesaria de datos para realizar la modelación y la validación.

Es decir, que el programa construya un modelo a partir de los datos seleccionados para esta operación; y verifique la

exactitud de los mismos con los datos restantes, en la figura 3.3.1.4 se muestra como realizar esta operación.

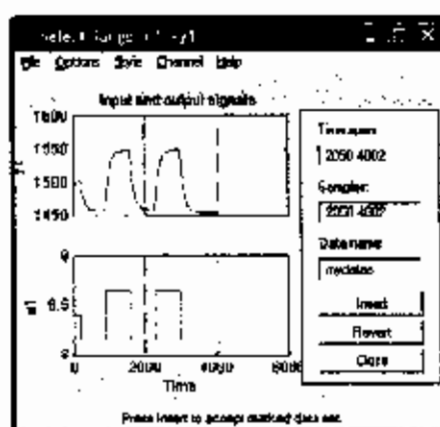


FIGURA 3.3.1.4 SELECCIÓN DE RANGOS DE TRABAJO Y VALIDACION DE MODELOS

Esto se realiza escogiendo la opción Selección de Rangos (select range) desde el menú desplegable pre-procesos, los mismos son creados en pizarras separadas y con diferentes colores.

Las pizarras de trabajo y validación de datos tiene el nombre de la pizarra anterior adicionando la letra "e" y "v" respectivamente

Estas deben ser desplazadas a los campos de Datos de Trabajo (Working data) y Validación de Datos (Validation



data), espacios seleccionados propiamente para la elección de modelos por el programa identificador de sistemas.

En el menú desplegable pre-procesos existe una opción Inicio Rápido (Quick start), como se aprecia en la figura 3.3.1.5; esta selección permite realizar los pasos anteriores automáticamente.

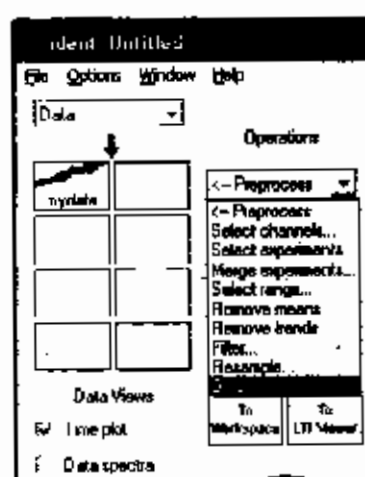


FIGURA 3.3.1.5 SELECCIÓN EMPEZAR RAPIDO

Una vez realizados todos los pasos de manipulación de datos, las pizarras de los mismos quedan de la siguiente manera como se muestra en la figura 3.3.1.6, dando paso a la creación de modelos matemáticos.

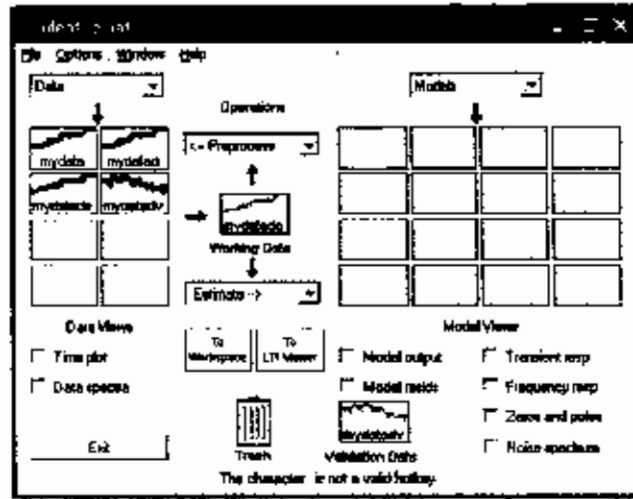


FIGURA 3.3.1.6 PIZARRAS DE DATOS



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

### 3.3.2. Descripción de las Pizarras de Modelos

De igual manera en el menú desplegable Estimar, existe la misma opción, Inicio Rápido (Quick start), que realiza las funciones de correlación de modelos y modelo paramétrico.

Cada grafica es mostrada en una pizarra con el nombre del modelo utilizado para su cálculo, como se aprecia en la figura

3.3.2.1.



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

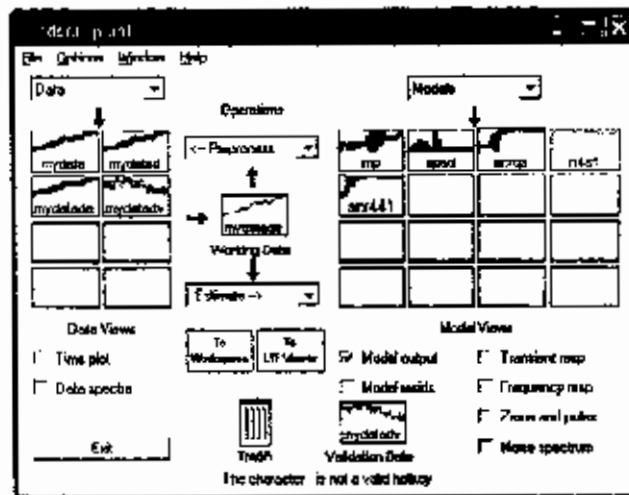


FIGURA 3.3.2.1 VISUALIZACIÓN DE PIZARRAS DE MODELOS PARAMÉTRICOS

Cada modelo que el programa selecciona automáticamente se valida con los datos que han sido seleccionados para esta tarea, mostrando de esta manera una serie de graficas donde su objetivo es buscar la que mas se aproxime a la forma que toman los datos de la planta que se ingresaron.

Las graficas que presenta el identificador de sistemas en las pizarras de modelos son:

**Modelo de correlación.-** Es la respuesta grafica que proporciona una entrada impulso sobre los datos que se ingresaron, por esta razón el icono toma el nombre "imp".

**Modelo spad.-** Es un modelo de respuesta de frecuencia que se emite sobre los datos que se ingresaron.

**Modelo arxqs.-** Es un modelo de ecuación diferencial lineal para tiempos discretos, la estructura de este modelo esta definida por tres integradores que son  $na$ : El número de polos,  $nb$ : Es el número de zeros y  $nk$ : Este es el tiempo de retardo o más conocido como tiempo muerto del sistema.

El modelo arxqs esta definido estructuralmente de la siguiente manera:

Modelo de Tiempo Discreto IDPOLY:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$

$$A(q) = 1 - 0.4251 (+0.02177) q^{-1} - 0.848 (+0.02363) q^{-2} + 0.06057 (+0.02366) q^{-3} + 0.2218 (+0.02136) q^{-4}$$

$$B(q) = 1.043 (+0.294) q^{-6} - 0.7097 (+0.4163) q^{-7} + 0.4323 (+0.4166) q^{-8} + 0.9612 (+0.3019) q^{-9}$$

Intervalo de Muestreo: 1

El sistema identificador permite utilizar un modelo arx(441), este esta estructurado de la misma manera que el modelo

anterior pero con menor tiempo de retardo, la forma en que esta organizado es la siguiente:

Modelo de Tiempo Discreto IDPOLY:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$

$$A(q) = 1 - 0.4619 (+0.02136) q^{-1} - 0.8837 (+0.02351) q^{-2} + 0.08396 (+0.02375) q^{-3} + 0.2691 (+0.0208) q^{-4}$$

$$B(q) = -0.1471 (+0.2977) q^{-1} + 0.0873 (+0.4207) q^{-2} + 0.06381 (+0.4206) q^{-3} + 1.4 (+0.3076) q^{-4}$$

Intervalo de Muestreo: 1

**Modelo n4s1.-** Es un modelo de estados, su estructura se basa fundamentalmente en el orden del modelo y el tiempo de retardo del sistema, la forma de representación del modelo es forma matricial como se puede apreciar a continuación.

$$\text{State-space model: } \begin{aligned} x(t+T_s) &= A x(t) + B u(t) + K e(t) \\ y(t) &= C x(t) + D u(t) + e(t) \end{aligned}$$

A =

$$\begin{array}{c} x1 \\ x1 \quad 0.99154 \end{array}$$

B =

$$\begin{array}{c} u1 \\ x1 \quad 0.0017288 \end{array}$$

C =

$$\begin{array}{c} x1 \\ y1 \quad 911.87 \end{array}$$

$$D = \begin{matrix} & & u1 \\ y1 & & 0 \end{matrix}$$

$$K = \begin{matrix} & & y1 \\ x1 & & 0.0002295 \end{matrix}$$

$$x(0) = \begin{matrix} & & \\ x1 & & 0 \end{matrix}$$

Intervalo de Muestreo: 1

El programa Identificador de sistemas a medida que evalúa los datos y crea modelos aproximados de los mismos, presenta graficas que permiten examinar el comportamiento de cada uno de estos modelos.

Seleccionando la opción '*Respuesta de Transiente*' muestra el resultado que produce el modelo seleccionado a una entrada tipo escalón unitario o impulso.

Es posible presentar la respuesta de todos los modelos creados al igual que el modelo de correlación en la misma

figura, la forma de distinguir una gráfica de otra es por medio de su color representativo como lo muestra la figura 3.3.2.2.

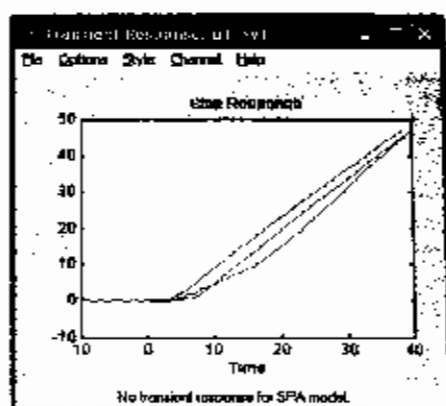


FIGURA 3.3.2.2 RESPUESTA DE TRANSIENTE

Otra forma de visualizar el comportamiento de los modelos seleccionados es escogiendo la siguiente opción '*Respuesta de Frecuencia*', o mediante el diagrama de Bode de cada uno de los modelos creados, como se muestra en la figura 3.3.2.3.

Al igual que en la gráfica anterior la respuesta de frecuencia permite visualizar todos los modelos tanto de amplitud o ganancia y de fase en un solo esquema.

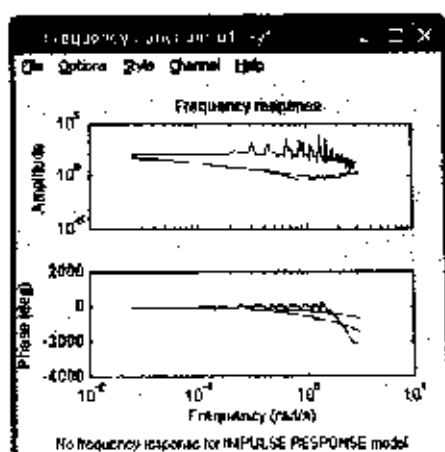


FIGURA 3.3.2.3 RESPUESTA DE FRECUENCIA

Otra forma de conocer un modelo es la gráfica de '*Polos y Zeros*', este resultado es efectivo siempre y cuando se identifiquen claramente con el mapa de polos y zeros en tiempo discreto, ya que esta es la representación que se muestra en la figura 3.3.2.4.

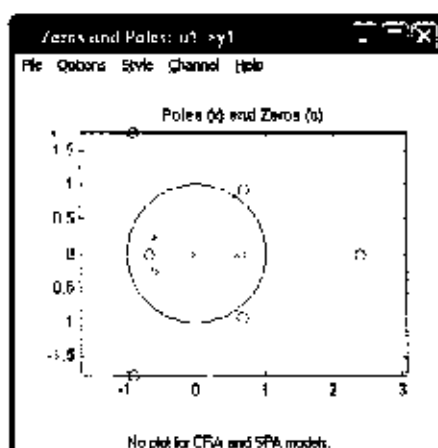


FIGURA 3.2.2.4 MAPA DE POLOS Y ZEROS EN TIEMPO DISCRETO



Al igual que en las anteriores, también se puede apreciar los polos y zeros de cada uno de los modelos creados en el programa.

El programa identificador de sistemas pese a trabajar con modelos continuos, realiza cálculos y evalúa los diferentes modelos en forma discreta.

Todas las pizarras que se presentan tanto en el espacio de datos como en el de modelos, tienen un color que los identifican, las gráficas que se pueden obtener de estas pizarras tendrán el mismo color para poder así diferenciar su forma característica.

### **3.3.3. Validación del Modelo Dinámico Creado**

El programa Identificador de Sistemas, valida internamente los modelos que selecciona con los datos asignados para esta tarea.

Al mismo tiempo muestra gráficas que contienen cada uno de estos modelos y el porcentaje de aproximación con los datos reales.

En la figura 3.3.3.1 se puede apreciar la diferencia entre cada modelo evaluado por medio de su color representativo, y el porcentaje de cada uno de ellos con los datos reales.

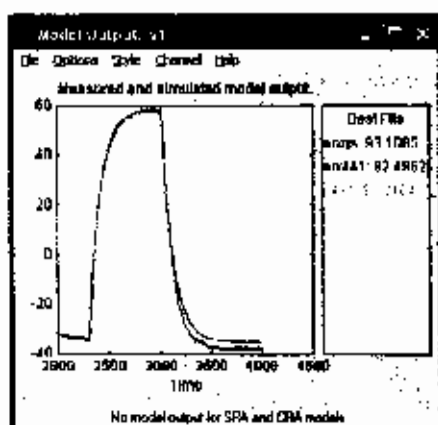


FIGURA 3.3.3.1 RESULTADOS DE LOS MODELOS

Otra forma de validar el modelo seleccionado es realizar una comparación de la Respuesta de Transiente de cada uno de ellos con el real, para ello se requiere que el modelo sea llevado al "Workspace" y transformado en Función de Transferencia.

Para transportar los modelos al "Workspace" como muestra la figura 3.3.3.2, solo se necesita arrastrar los modelos al espacio "para Workspace (To Workspace)" dentro de la misma ventana del sistema de identificación.

Name	Base	Bytes	Class
arx441	tf	9728	tf object
arx442	tf	9808	tf object
arx443	tf	20688	tf object

FIGURA 3.3.3.2 MODELOS INGRESADOS AL WORKSPACE

Los modelos tienen un formato de representación polinomial de Funciones de transferencia, por ello para poder visualizar la información que contiene el modelo se ejecuta el siguiente comando en la ventana de comandos del Matlab.

```
>> sys=tf(arx441)
```

Transfer function from input "u1" to output "y1":

$$\frac{-0.1471 z^3 + 0.0873 z^2 + 0.06381 z + 1.4}{z^4 - 0.4619 z^3 - 0.8837 z^2 + 0.08396 z + 0.2691}$$

Transfer function from input "v@y1" to output "y1":

$$\frac{0.223 z^4 + 3.247e-017 z^3 - 2.92e-017 z^2 + 4.153e-017 z}{z}$$

$$- 1.634e-021$$

---


$$z^4 - 0.4619 z^3 - 0.8837 z^2 + 0.08396 z + 0.2691$$

I/O groups:

Group name	I/O	Channel(s)
Measured	1	1
Noise	1	2



CIB-ESPOL

Sampling time: 1

La primera función de transferencia en tiempo discreto es el modelo, la segunda es el ruido que ingresa al modelo. De estos datos solo tomamos en cuenta la primera función con el tiempo de muestreo y la rescribimos como lo hacemos a continuación:

```
>> num=[-0.1471 0.0873 0.06381 1.4];
>> den=[1 -0.4619 -0.8837 0.08396 0.2691];
>> sys1=tf(num,den,0.01)
```

Transfer function:

$$\frac{-0.1471 z^3 + 0.0873 z^2 + 0.06381 z + 1.4}{z^4 - 0.4619 z^3 - 0.8837 z^2 + 0.08396 z + 0.2691}$$

---


$$z^4 - 0.4619 z^3 - 0.8837 z^2 + 0.08396 z + 0.2691$$

Sampling time: 0.01



CIB ESPOL



CIB-ESPOL

Como se puede apreciar el tiempo de muestreo fue corregido al convertir los polinomios en Función de Transferencia, esto es de 1 a 0.01 con la finalidad de que el programa no tome cada muestra en un segundo sino en 0.01 de segundo, esto se lo realiza para que coincida el tiempo de el modelo con el del real.

El tiempo de muestreo varía dependiendo de los parámetros de simulación que se ingresen en los bloques de Simulink, esto es debido, a que ese es el tiempo con el que se recolectan los datos mientras se ejecute la simulación.

La función de transferencia sigue estando en tiempo discreto, para convertirla a tiempo continuo ejecutamos el siguiente comando en la ventana de comandos de Matlab.

```
>> sys2=d2c(sys) .
```

Transfer function:

$$-530.4 s^3 + 3.649e004 s^2 - 9.164e006 s + 5.11e008$$

---


$$s^4 + 131.3 s^3 + 8.056e004 s^2 + 3.329e006 s + 2.715e006$$

De igual manera se realizan las mismas instrucciones para cada uno de los modelos a excepción de `arxqs`, este modelo tiene muchos retardos de tiempo lo que proporciona errores al efectuar la conversión de tiempo discreto a continuo.

Las respuestas de Funciones de transferencia en tiempo continuo de cada modelo son las siguientes:

#### **Modelo Arx(441)**

Transfer function:

$$\frac{-530.4 s^3 + 3.649e004 s^2 - 9.164e006 s + 5.11e008}{s^4 + 131.3 s^3 + 8.056e004 s^2 + 3.329e006 s + 2.715e006}$$

#### **Modelo n4s1**

Transfer function:

$$\frac{158.3}{s + 0.8538}$$

El modelo discreto es de cuarto orden y el modelo continuo es de primer orden y la respuesta de cada modelo a una

entrada escalón unitario se la puede obtener de la siguiente manera:

```
>> [X,T]=step(sys2);  
>> [X1,T1]=step(sys5);  
>> plot(T,X,'r',T1,X1,'g')
```

En la primera instrucción, capturamos los datos del modelo `arx(441)` en un arreglo de matrices, en la segunda instrucción se realiza la misma acción con el modelo `n4s1`, donde `X` es la variación de velocidad en revoluciones por minuto y `T` la variación de tiempo en segundos.

Con la tercera instrucción graficamos los arreglos en la misma figura usando el comando `plot`, y seleccionamos el color para cada una de ellas, como por ejemplo para el modelo `arx(441)` el color rojo, para el modelo `n4s1` el color verde , esto se puede apreciar en la figura 3.3.3.3.

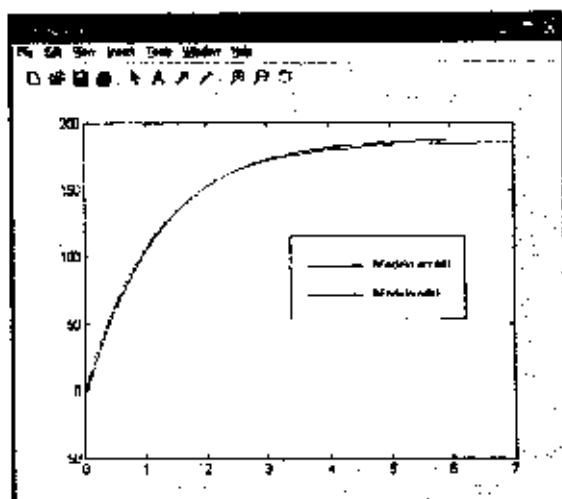


FIGURA 3.3.3.3 RESPUESTA DE MODELOS A UNA ENTRADA ESCALÓN UNITARIO

Ambos modelos mantienen la dinámica de la planta, se lo puede comprobar por las curvas de respuesta de cada uno que son prácticamente iguales.

A diferentes valores de set point se observa el comportamiento de la planta, la misma acción se la realiza a ambos modelos con la finalidad de determinar quien mantiene la dinámica propia de la planta pese a sufrir cambios en las señales de entrada al sistema.

Como resultado, el modelo de primer orden es quien identifica mejor a la planta, pues su forma de respuesta a las



diversas perturbaciones mantiene la dinámica, acción que se ve reflejada en el mismo proceso de la planta.

Para el análisis que se realizará en capítulos posteriores se utilizará el modelo continuo de primer orden, ya que al parecerse a la dinámica de la planta brinda facilidades para efectuar los diversos procedimientos que se necesitan en el estudio de la misma.

# CAPITULO 4

## 4. ELABORACIÓN DE PRÁCTICAS.

En el presente capítulo se mostrará como realizar las prácticas y los resultados que se deben obtener de las mismas, estas experiencias se basan en la construcción de la planta, ya que a medida que se desarrollaban las diferentes pruebas y ajustes para un buen desempeño de las misma, evolucionaban las múltiples ideas para la creación de las prácticas.

### 4.1. Ajuste de la Respuesta del Sistema utilizando la herramienta Single Input Single Output (SISO) de Matlab.

#### 4.1.1. Objetivos.

- 1) Analizar la respuesta de un sistema de primer orden.
- 2) Determinar el tipo de Controlador que ajuste el comportamiento de la planta a un error de sistema del 5%.

- 3) Establecer un controlador que cumpla con un error de sistema del 0%, y acople el comportamiento de la planta a un sobre nivel porcentual del 10% y un tiempo de estabilización de 4 segundos.

#### 4.1.2 Teoría.

##### Caracterizar la Respuesta de Primer Orden.

Existen sistemas que por diversos motivos no es posible determinar su Función de Transferencia, una solución para este problema es analizar la curva de reacción del sistema a una entrada escalón de paso A.

En la figura 4.1.2.1 se puede visualizar un ejemplo de curva de respuesta de un sistema desconocido.

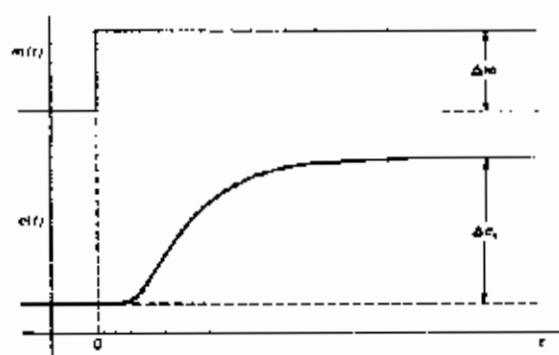


FIGURA 4.1.2.1 RESPUESTA A ENTRADA ESCALON

A partir de la gráfica de respuesta que se obtiene, se analiza los parámetros de la misma y se adquiere los parámetros de la Función de Transferencia que caracteriza a este sistema.

En la figura 4.1.2.2 muestra la forma en que se debe proceder a determinar los parámetros del sistema, y con estos parámetros podemos determinar la función de transferencia, la cual tiene la siguiente forma.

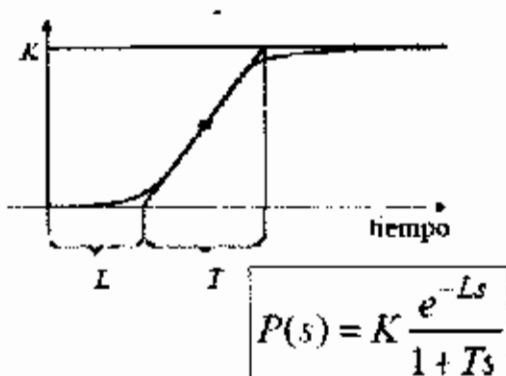


FIGURA 4.1.2.2 PARAMETROS DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA.

### **Error del Sistema**

El error de sistema se define como la diferencia que existe entre la señal de entrada y la señal de salida mientras ambas se encuentren en las mismas unidades.

En la figura 4.1.2.3 se muestra el sistema que se empleará para el análisis del error del sistema.

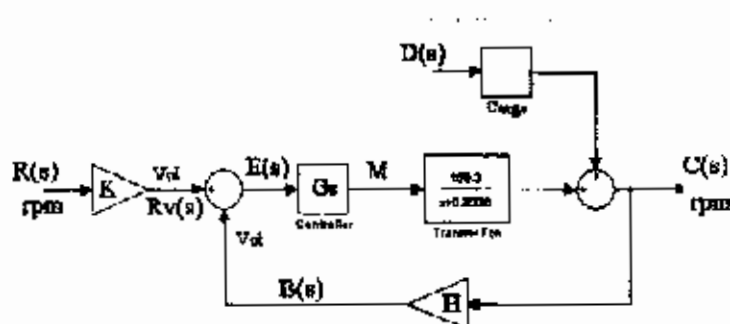


FIGURA 4.1.2.3 SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD

$$E(s) = R(s) - C(s)$$

donde :

$$C(s) = \frac{GGc}{1 + GGcH} R(s) = \frac{GGcK}{1 + GGcH} R(s)$$

$$E(s) = \left[ 1 - \frac{GGcK}{1 + GGcH} \right] R(s) = \frac{1 + GGcH - GGcK}{1 + GGcH} R(s)$$

Cuando  $H = K$ , entonces:

$$E(s) = \frac{1}{1 + GGcH} R(s)$$

De esta manera queda definido el error del sistema.

### ***Una Entrada Una Salida (SISO).***

La herramienta SISO es una herramienta de interfase gráfica con el usuario (GUI), la cual permite utilizar gráficas de el lugar Geométrico de las Raíces, Diagramas de Bode, Nyquist, etc.

El SISO por defecto despliega dos gráficas estas son Lugar Geométrico de la Raíces y Diagramas de Bode, las mismas que muestran la dinámica propia de la planta, y a su vez son interactivas; es decir, que si cambia la ganancia o algún parámetro esto se ve reflejado en ambas gráficas.

Para utilizar esta herramienta desde la ventana de comandos ingrese la instrucción:

```
>> sisotool(sys),
```

Al ingresar el comando abre la herramienta SISO, en la gráfica 4.1.2.4 se muestra el GUI y parte de la terminología del SISO.

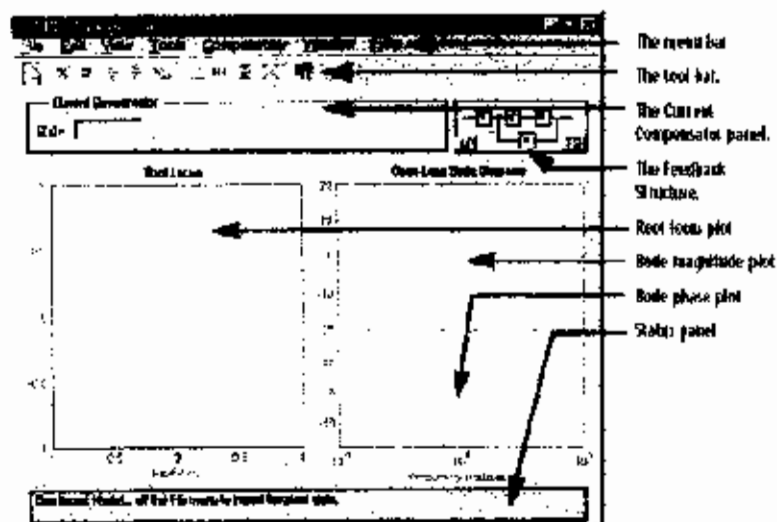


FIGURA 4.1.2.4 VENTANA DE DISEÑO SISO

El  $H(s,k)$  denota una función de transferencia de un sistema cuyos coeficientes dependen del parámetro real  $k$ , el cual es una ganancia.

Una gráfica de trayectoria de las raíces muestra los lugares geométricos de los polos y zeros de  $H(s,k)$  en el plano complejo donde por lo general el parámetro  $k$  es variado.

Para realizar la gráfica de trayectoria de las raíces se utiliza la ecuación característica del sistema en lazo cerrado.

Estas gráficas muestran claramente la contribución de los polos o zeros de lazo abierto a las ubicaciones de los polos de lazo cerrado.

Este método es una técnica gráfica muy eficiente para investigar los efectos de la variación de los parámetros en un sistema dependiendo de la ubicación de los polos de lazo cerrado.

#### 4.1.3 Procedimiento.

##### Literal 1)

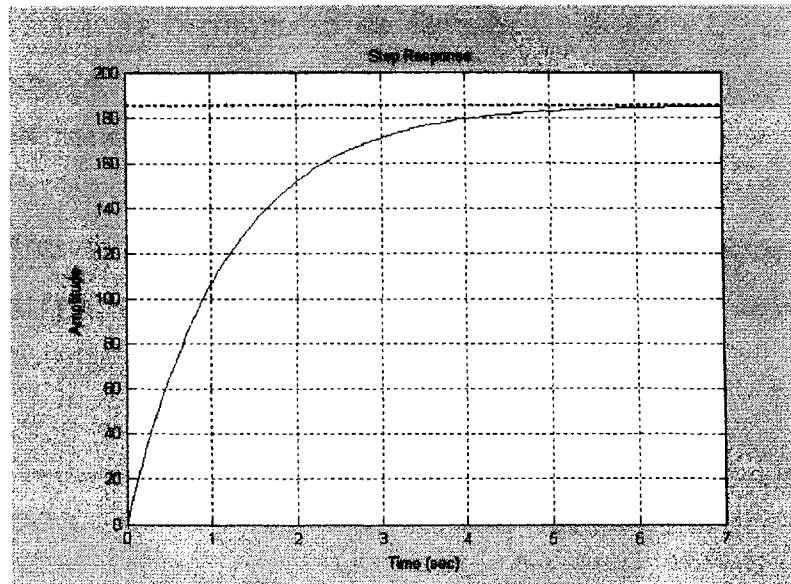


##### Análisis la respuesta de un sistema de primer orden

- a. Con la gráfica que se muestra en la figura 4.1.3.1 determine los parámetros de la función de transferencia, mediante el método de la curva de reacción.
  
- b. Aplique una entrada tipo escalón unitario y compare los resultados de la función de transferencia que obtuvo de la curva de respuesta, con, el dado en el bloque de la planta de la figura 4.1.3.2.







**FIGURA 4.1.3.1 CURVA DE RESPUESTA DEL SISTEMA**

**Literal 2)**

**Determinar el tipo de Controlador que ajuste el comportamiento de la planta a un error de sistema del 5%.**

1. Ajustar la constante de la señal de prueba, de tal manera que sea el 5% del valor de la velocidad de operación en el punto de trabajo, donde  $K=H= 5.49 \cdot 10^{-3}$ .
2. Obtener los parámetros del controlador seleccionado para este caso.

3. Usando la herramienta de Simulación SISO, compruebe que los valores obtenidos logran que el sistema responda de manera especificada.
4. Usando la Planta real, realice el ajuste del controlador en la programación construida en Simulink y compruebe la operación del sistema.

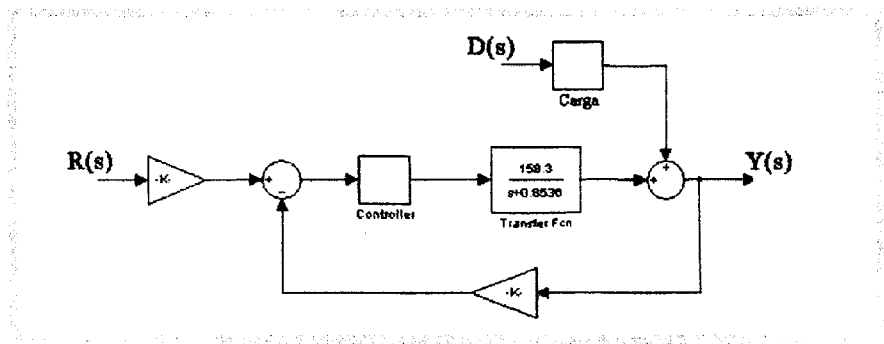


FIGURA 4.1.3.2 PROCESO DE CONTROL DE VELOCIDAD.

### Literal 3)

**Establecer un controlador que cumpla con un error de sistema del 0% y acople el comportamiento de la planta a un sobre nivel porcentual del 10% y un tiempo de estabilización de 4 segundos.**

1. Obtener los parámetros del controlador seleccionado que satisfaga los requerimientos propuestos, donde  $K=H=5.49 \cdot 10^{-3}$ .

2. Usando la herramienta de Simulación SISO, compruebe que los valores obtenidos logran que el sistema responda de manera especificada.
3. Usando la Planta real, realice el ajuste del controlador en la programación construida en Simulink y compruebe la operación del sistema



### Cálculos

A partir de la curva 4.1.3.1 se realiza el análisis para encontrar la función de transferencia, dando como resultado los siguientes parámetros:

$$K = 185$$

$$\tau = 1.379$$

Reemplazando los datos en la función de transferencia modelo para este tipo de respuesta se obtiene.

$$G(s) = \frac{185/1.379}{s + 1/1.379}$$

$$G(s) = \frac{134.16}{s + 0.725}$$



Se ingresa a la ventana de comandos del Matlab las dos funciones de transferencia, y, mediante los siguientes comandos se procede a graficar las respuestas de ambos sistemas.

```
>> num=158.3;
>> den=[1 0.8536];
sys=tf(num,den)
>> num1=134.16;
>> den1=[1 0.725];
>> sys1=tf(num1,den1)
>> [x,t]=step(sys1);
>> [x1,t1]=step(sys);
>> plot(t,x,'b',t1,x1,'y')
```

Con los tres últimos comandos se procede a guardar los resultados de los sistemas en arreglos matriciales, y después representarlos en una sola figura; como se muestra en la gráfica 4.1.3.3.

El modelo de la planta esta representado por el color amarillo, y el modelo que se obtiene de la curva de respuesta es de color azul.

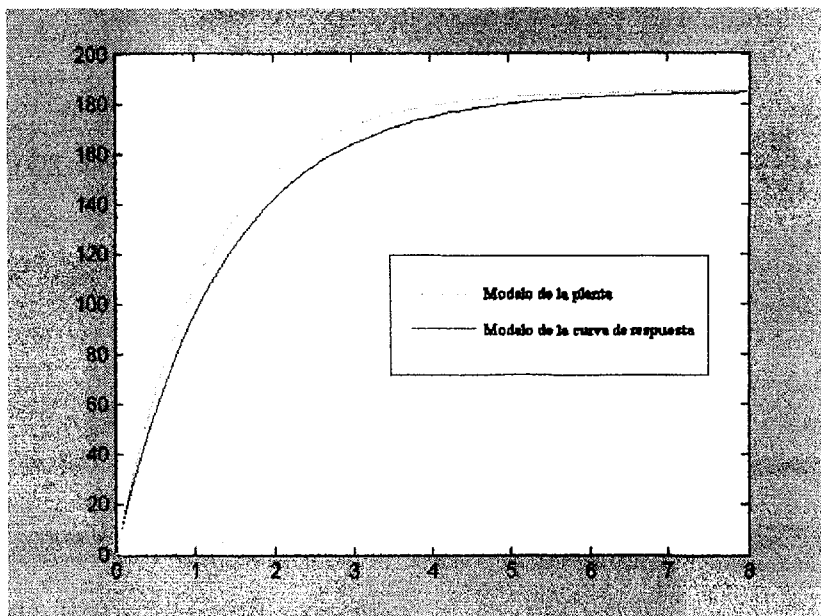


FIGURA 4.1.3.3 RESPUESTA DE AMBOS SISTEMAS A UNA ENTRADA TIPO ESCALÓN EN LAZO ABIERTO.

Para el literal 2 se realizan los siguientes cálculos en base a el error de estado estacionario con una entrada tipo escalón unitario.

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s)$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)}$$



$$0.05 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{0.869067K}{s + 0.8536}} = \frac{1}{1 + \frac{0.869067K}{0.8536}} = \frac{0.8536}{0.8536 + 158.3K}$$

$$K = 18.66$$

En la ventana de comandos del Matlab se ingresa la Función de Transferencia y se abre el programa SISO con las siguientes instrucciones.

```
>> num=[158.3];
>> den=[1 0.8536];
>> sys=tf(num,den)
>> sisotool(sys)
```



En la ventana principal de inicio del programa aparece el lugar geométrico de las raíces del sistema que ingresamos, como se muestra en la figura 4.1.3.4.

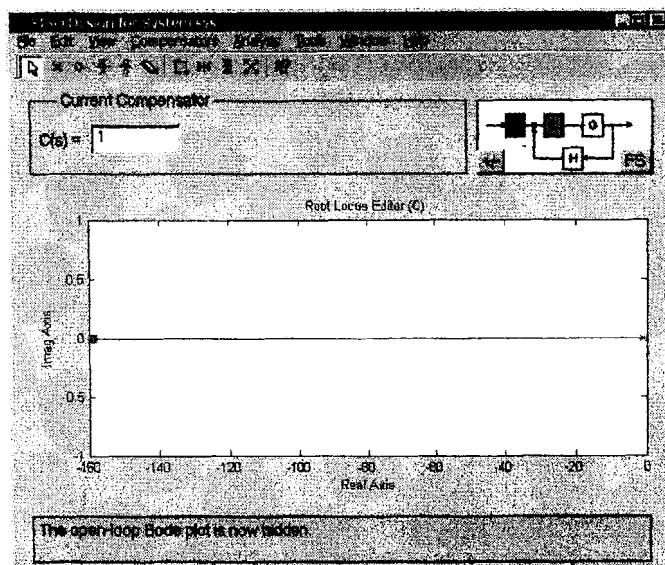
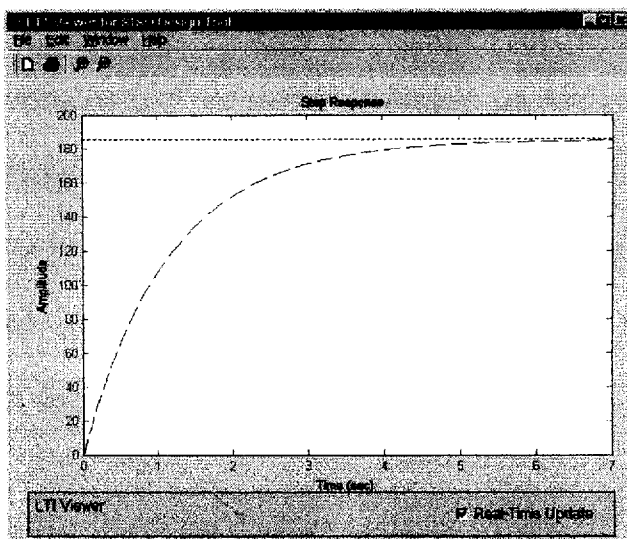


FIGURA 4.1.3.4 TRAYECTORIA DE LAS RAICES DEL PROCESO DE CONTROL DE VELOCIDAD

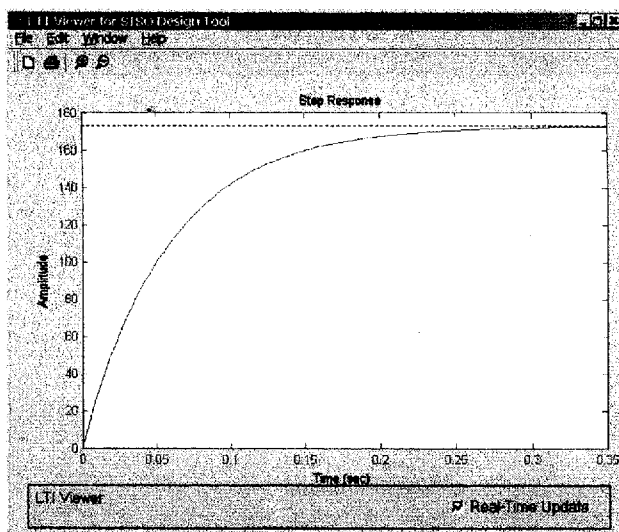
La respuesta del sistema se puede adquirir con seleccionar, respuesta a un comando step, desde el menú análisis, como se puede apreciar en la figura 4.1.3.5.

Esta opción abre una ventana que muestra el estado actual del sistema; es decir, con los parámetros que mantiene en ese momento. El visualizador gráfico es interactivo y cualquier modificación en la ventana principal del SISO se reflejará en la gráfica.



**FIGURA 4.1.3.5 RESPUESTA DEL SISTEMA A UNA ENTRADA TIPO ESCALON.**

En la ventana del SISO modificamos la ganancia hasta el valor calculado y verificamos los cambios en la respuesta de lazo cerrado, como se muestra en la figura 4.1.3.6.

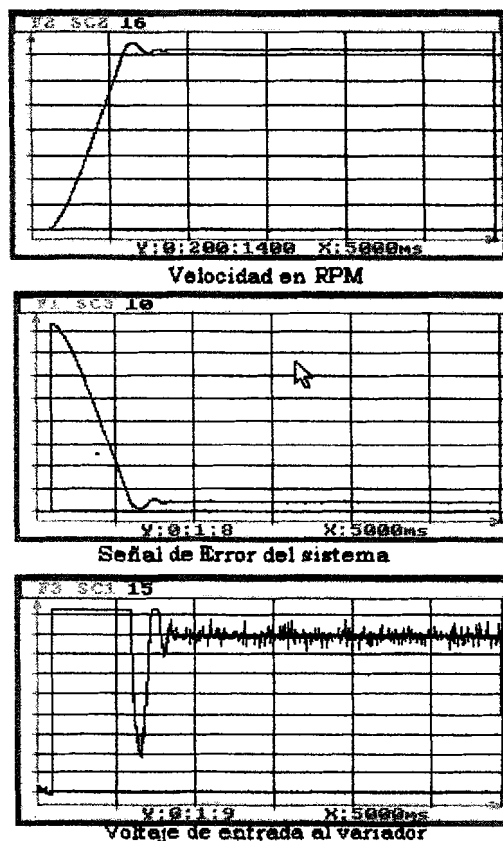


**FIGURA 4.1.3.6 RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROLADOR PROPORCIONAL.**



La comprobación de los resultados obtenidos teóricamente y reafirmados bajo el programa de Matlab es realizado en el sistema real; es decir, los valores de los parámetros del controlador que fueron encontrados previamente en la parte teórica, son utilizados para el funcionamiento de la planta de control de velocidad.

La respuesta de la planta a un controlador proporcional se puede apreciar en la figura 4.1.3.7.



**FIGURA 4.1.3.7 RESULTADOS PRACTICOS DE LA PLANTA CON CONTROLADOR PROPORCIONAL.**

Para el literal 3 se realizan los cálculos del sistema con las siguientes restricciones: que el sobre nivel porcentual sea menor al 10% y el tiempo de estabilización sea menor a 4 segundos.

$$P.O. = 100e^{\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

$$10 = 100e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

$$0.1 = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

$$2.3026 = \frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$5.3019 = (\pi\zeta)^2 + 5.3019\zeta^2$$

$$\zeta = 0.591155$$

$$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n}$$

$$4 = \frac{4}{\zeta\omega_n}$$

$$\omega_n = 1.6916$$

Con la Función de Transferencia de la planta y la forma del controlador propuesto para este literal, se obtiene la Función Característica del Sistema.

$$G(s) = \frac{158.3}{s + 0.8536}$$

$$G(c) = K_1 \left( 1 + \frac{K_2}{s} \right)$$

$$T(s) = \frac{G(s)G(c)}{1 + G(c)GH(s)}$$

$$T(s) = \frac{\frac{158.3K(K_1s + K_1K_2)}{s(s + 0.8536)}}{1 + \frac{0.869067(K_1s + K_1K_2)}{s(s + 0.8236)}}$$

Donde:  $K = 0.00549$ , a partir de esta Función de Transferencia se encuentra la ecuación característica clásica y se obtiene los siguientes resultados:

$$q = s^2 + (0.8536 + 0.869067K_1)s + 0.869067K_1K_2$$

$$q = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$$

$$2\zeta\omega_n = 0.8536 + 0.69067K_1$$

$$K_1 = 1.3191$$

$$\omega_n^2 = 0.869067K_1K_2$$

$$K_2 = 2.4961$$

A partir de los resultados encontrados se puede definir al controlador de la siguiente manera:

$$G(c) = 1.3191 \left( 1 + \frac{2.4961}{s} \right)$$

En la ventana de comandos del Matlab se ingresa la Función de Transferencia de la planta, y luego se importa la misma al SISO, como se muestra a continuación.

```
>> num=[158.3]; den=[1 0.8536];
```

```
>> sys=tf(num,den)
```

```
>> sisotool(sys)
```

En la ventana del SISO, se adiciona un polo en el origen que representará a la parte integral, y un cero que debe ser colocado en -2.4961, a demás de una ganancia igual a 1.3191 como se indicó en la forma del controlador que se utilizó para los cálculos.

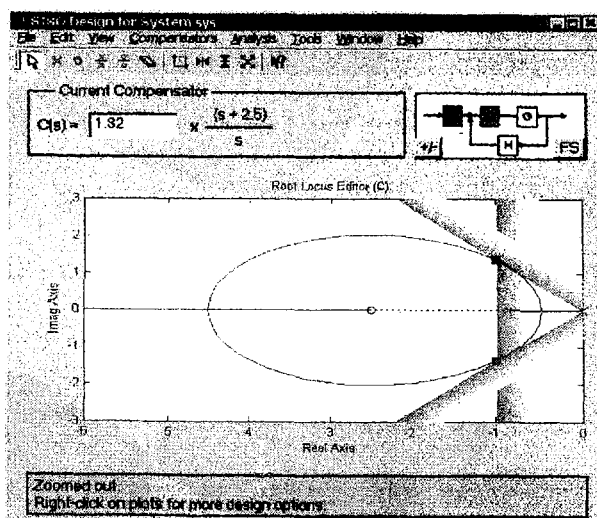


FIGURA 4.1.3.8 TRAYECTORIA DE LAS RAICES DEL SISTEMA CON CONTROLADOR PI.

La figura 4.1.3.8 muestra la trayectoria de las raíces con el controlador y la ubicación de la constante  $K_p$  y  $K_i$ .

La gráfica de respuesta del sistema a una entrada tipo escalón unitario, proporciona información sobre el tiempo de estabilización y el sobre nivel porcentual, los cuales se ajustan a los requerimientos pedidos para esta experiencia, como se muestra en la figura 4.1.3.9.

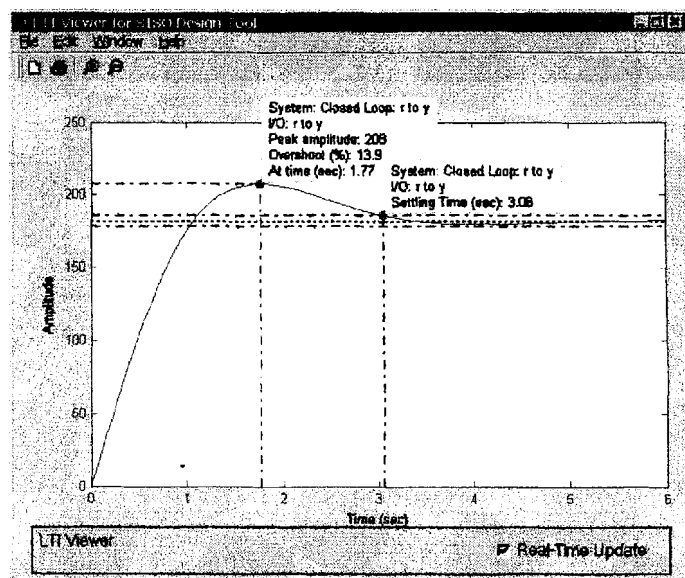
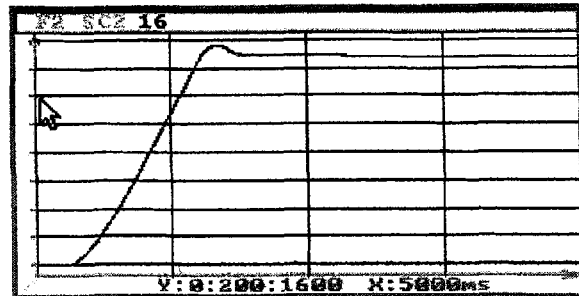


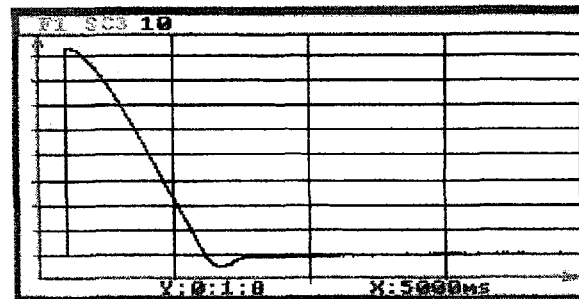
FIGURA 4.1.3.9 RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROLADOR PI

Para corroborar el análisis realizado en este literal, se procede a ingresar los valores del controlador hallado teóricamente, a la planta de control de velocidad la cual

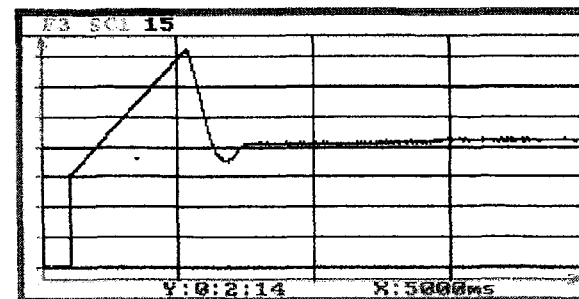
será puesta en funcionamiento con estos parámetros dando como resultado las siguientes gráficas que se muestran en la figura 4.1.4.0.



Señal de velocidad en RPM



Señal de error del Sistema



Señal que ingresa al variador

FIGURA 4.1.3.10 RESPUESTA DE LA PLANTA CON UN CONTROLADOR PI.

## **4.2 Determinación del Modelo Matemático usando el Software System Identification.**

### **4.2.1. Objetivos.**

1. Con los datos recopilados de la planta trabajando en el punto de operación, encuentre el modelo matemático de la misma con la ayuda del System Identification.
2. Analice las gráficas que presenta el programa en las pizarras modelos, y transforme estos a funciones de transferencia.
3. Compare y analice los resultados de cada función de transferencia al aplicar una señal de entrada tipo escalón unitario.

### **4.2.2. Teoría.**

El System Identification es una herramienta de Matlab que ayuda a identificar por medio de funciones de transferencias la dinámica o comportamiento de una planta.



Su funcionamiento se basa en la adquisición de datos de la planta o proceso a identificar, por ello es preferible que antes de usarlo se tenga a la mano un archivo o bases de datos con los que se pueda trabajar.

La planta a identificar debe ser sometida a una señal de perturbación después de alcanzar la estabilización, esta puede ser en forma de onda cuadrada con un periodo  $T$  o en forma de tren de pulsos con un período variable.



De los datos recopilados solo se tomarán en cuenta desde el momento en que la planta se ve afectada por la señal perturbadora, esto es debido a que se necesita conocer la dinámica de la misma bajo los efectos de una perturbación.

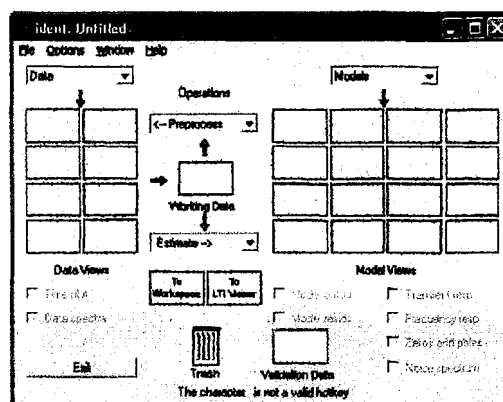


FIGURA 4.2.2.1 VENTANA DEL IDENTIFICADOR DE SISTEMAS



El **System Identification** presenta la ventana de trabajo que se muestra en la figura 4.2.2.1.

En esta ventana se procede a ingresar los datos recopilados de la planta, los mismos que se ubican en los espacios destinados para el tratamiento de datos.

Luego de realizar la selección de rangos de los mismos para validación y selección de modelos, se procede a evaluarlos, sea de forma rápida o de forma continua con cada uno de los diferentes modelos que utiliza el programa.

Una vez evaluados se procede a validar cada uno de ellos con los datos reales y se escoge los que tengan mayor aproximación a la realidad.

#### **4.2.3. Procedimiento.**

Los datos deben ser ingresados al workspace del Matlab, para realizar esta acción se debe denominar con una variable a los datos de entrada como a los de salida de la planta.

**Literal 1**

- Desde el archivo de datos, se procede a seleccionar la cantidad necesaria para trabajar con ellos, es decir solo la parte donde la planta se ve afectada por la perturbación, esto se realiza con la siguiente instrucción.

```
>> wm = wm(800:4801);
```

```
>> mg = mg (800:4801);
```

Es necesario que la cantidad de datos de la entrada sea igual al de la salida.

Se procede a abrir la ventana de trabajo del identificador de sistemas igual al de la figura 4.2.2.1. Para cargar los datos adquiridos de la planta hacia el System Identification, se despliega el menú datos y se selecciona la opción Importar, esto abre el cuadro de dialogo del mismo nombre que se muestra en la figura 4.2.3.1; donde permite ingresar los datos que se encuentran en forma matricial en el Workspace.

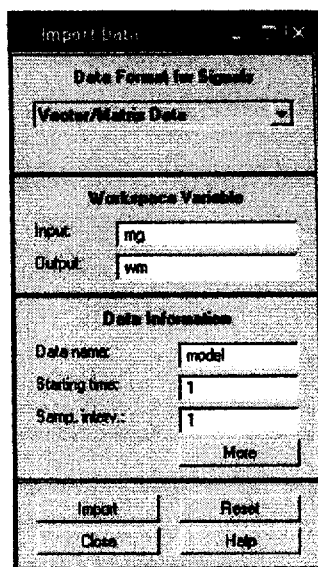
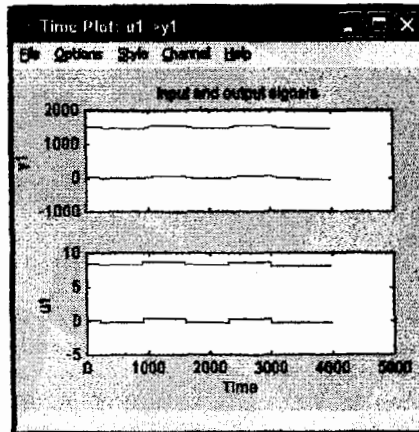


FIGURA 4.2.3.1 CUADRO DE DIALOGO IMPORTAR DATOS

Para ingresar los datos al programa basta con llenar los campos de información del cuadro de dialogo con los nombres de las variables que se denominaron a cada rango de datos y presionar importar.

Del menú desplegable pre procesos se selecciona la opción inicio rápido, este comando ejecuta varias instrucciones y presenta gráficas de cada una de ellas.

Entre las gráficas que se muestran están las de ingreso de datos y la eliminación de niveles constantes innecesarios, en la figura 4.2.3.2 se muestra las gráficas que se obtendrán al realizar esta operación.



**FIGURA 4.2.3.2 REPRESENTACION DE DATOS CON Y SIN ELIMINACION DE NIVELES CONSTANTES**

Cada instrucción que se ejecuta hace que se llene una pizarra en el espacio de datos y cada una de estas tiene un color representativo que se mantendrá mientras se este utilizando esta sesión.

La ventana de pizarras se muestra como en la figura 4.2.3.3 después de haber ejecutado por completo todas las operaciones de tratado de datos.



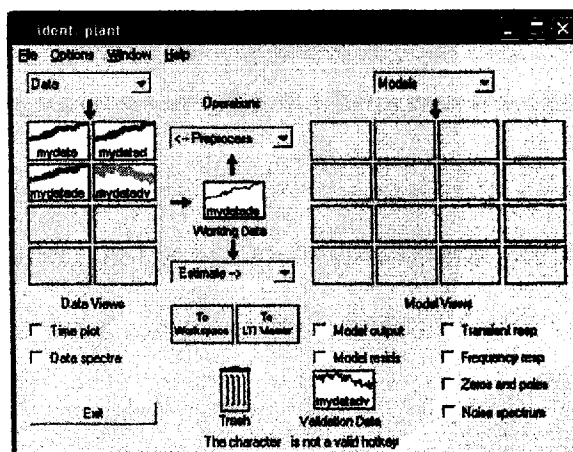


FIGURA 4.2.3.3 PIZARRAS DE DATOS

Desde el menú desplegable estimación se selecciona la opción inicio rápido, este comando efectúa una cantidad de instrucciones las cuales están determinadas a encontrar el modelo matemático mas aproximado a los datos reales de planta.

La opción inicio rápido, hace que en cada campo o espacio determinado para los modelos se llene con una pizarra diferente.

## Literal 2

En la primera pizarra se creará un bosquejo de la respuesta de los datos reales de planta a una entrada impulso.

En la segunda un esquema de la frecuencia de los datos y a partir de la tercera pizarra los modelos que más se aproximen.

Luego de parada la ejecución de esta operación las pizarras de modelos quedan de la siguiente manera como se muestra en la figura 4.2.3.4.

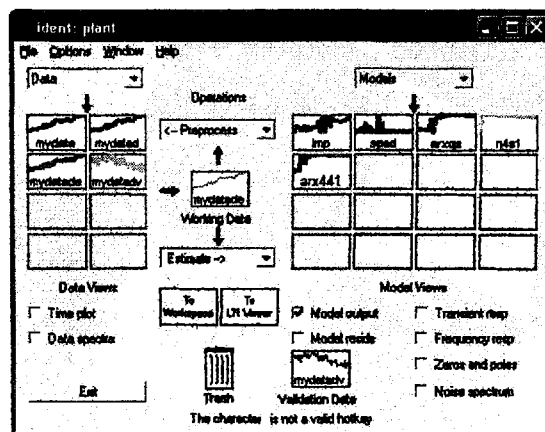


FIGURA 4.2.3.4 VISUALIZACION DE PIZARRAS DE MODELOS PARAMETRICOS

De igual manera cada pizarra tiene un color representativo y todas las pruebas que se realicen con estas mantendrán su color para diferenciarse entre ellas.

Con los comandos siguientes se puede obtener la función de transferencia de cada modelo:

```

>> sys=tf(arx441)
>> num=[-0.1471 0.0873 0.06381 1.4];
>> den=[1 -0.4619 -0.8837 0.08396 0.2691];
>> sys1=tf(num,den,0.01)
>> sys2=d2c(sys)

```

Con estas instrucciones se convierte el modelo arx(441) en función de transferencia en tiempo discreto, luego se reescribe la función de transferencia modificando el tiempo de muestreo y finalmente se convierte esta función en tiempo continuo, quedando como resultado la siguiente función de transferencia.

Transfer function:

$$-530.4 s^3 + 3.649e004 s^2 - 9.164e006 s + 5.11e008$$

---


$$s^4 + 131.3 s^3 + 8.056e004 s^2 + 3.329e006 s + 2.715e006$$

De igual manera se utiliza los mismos comandos para los siguientes modelos, la función de transferencia del modelo n4s1 es la siguiente:

#### 4.2.4. Validación del Modelo.



##### Literal 3

El programa Identificador de Sistemas, valida internamente los modelos que selecciona con los datos asignados para esta tarea, al mismo tiempo muestra gráficas que contienen cada uno de estos modelos y el porcentaje de aproximación con los datos reales.

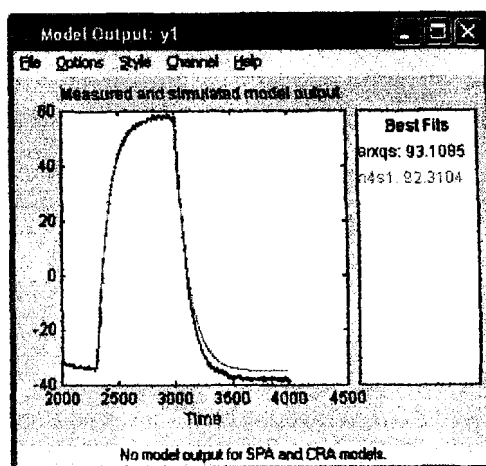


FIGURA 4.2.4.1 RESULTADOS DE LOS MODELOS

En la figura 4.2.4.1 se puede apreciar la diferencia entre cada modelo computado con los datos reales, y el porcentaje de cada uno de ellos.



Para verificar la dinámica del modelo, se grafica la repuesta del mismo a una entrada escalón unitario, como muestra la figura 4.2.4.2.

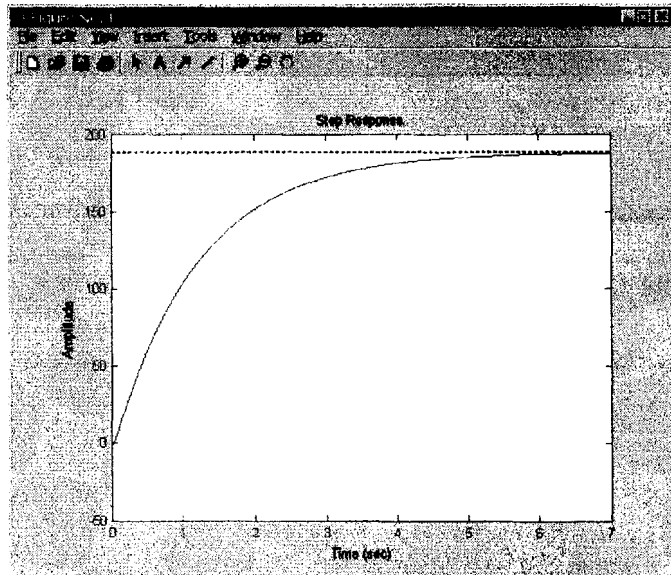


FIGURA 4.2.4.2 RESPUESTA DEL MODELO ARX(441) A UNA ENTRADA ESCALON UNITARIO

Las mismas instrucciones se pueden emplear para la construcción de la función de transferencia del modelo  $n4s1$ , dando como resultado la siguiente Función de transferencia.

Transfer function:

158.3

-----

$s + 0.8536$

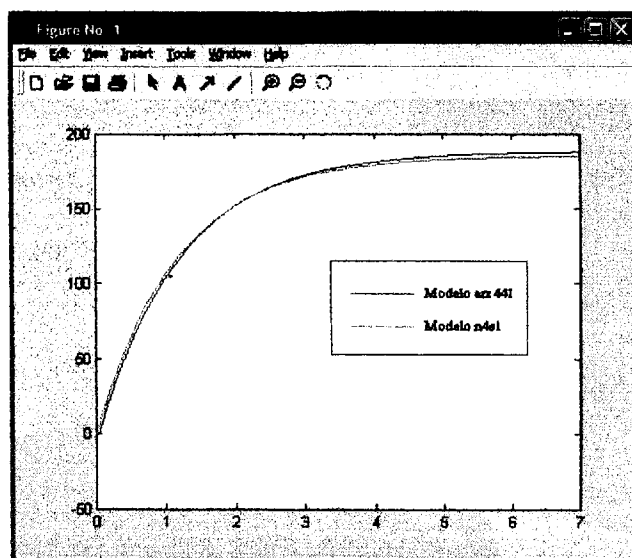
Al comparar las dos gráficas en una sola figura, se llenan archivos de información de ambos modelos y luego se los grafica, como se muestra con las siguientes instrucciones.

```
>> [X,T]=step(sys2);
>> [X1,T1]=step(sys5);
>> plot(T,X,'r',T1,X1,'g')
```



CIB-ESPOL

Para diferenciar la respuesta gráfica de los modelos se ingresan comandos seleccionando los colores que representaran a cada uno de ellos, como se muestra en la figura.



CIB-ESPOL

FIGURA 4.2.4.3 RESPUESTA DE MODELOS A ENTRADA ESCALON UNITARIO



CIB-ESPOL

Entre los modelos propuestos por el programa System Identification se debe seleccionar el que mejor aproximación tenga con los datos reales, acción que será determinada por el estudiante que realice la práctica.

### **4.3. Determinación de los Parámetros del Controlador por el método de Ziegler-Nichols.**

#### **4.3.1 Objetivos**

1. Utilizar la herramienta Simulink para realizar la adquisición de datos en tiempo real de la planta.
2. Determinar los parámetros del controlador PI por medio del método de Ziegler-Nichols.

#### **4.3.2 Teoría**

Existen muchas reglas para determinar las constantes de los controladores lo cual implica que no sean perfectas, una de ellas es la de Ziegler – Nichols (ZN).

Este método es utilizado para procesos sobre amortiguados o con integradores, basados en respuestas paso a paso; es decir, con una señal de paso unitario a la entrada del proceso.

Los datos se obtienen a partir de la curva de respuesta del sistema cuando la planta alcanza el set point determinado, esta acción se realiza mientras se trabaja en lazo abierto, como se muestra en la figura 4.3.2.1..

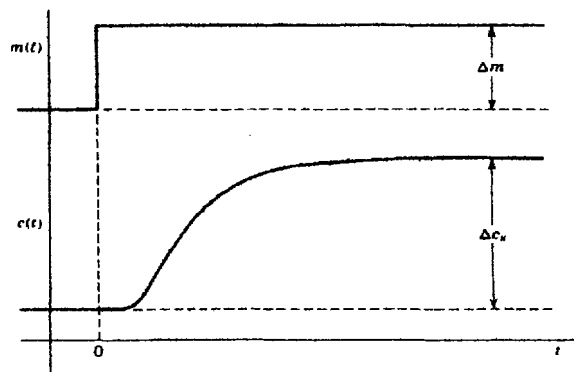


FIGURA 4.3.2.1 .MODELOS DE BUSQUEDA DE PARAMETROS

La Función de Transferencia del Controlador PID (CTF) es la que se exhibe en la ecuación 1, esta servirá de base para encontrar el controlador de la planta.

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

A partir de estos valores y con la ayuda de la tabla 4.3.2.1 se encuentran la constante de integración  $K_p$ , tiempo de integración  $T_i$  y el tiempo de derivación  $T_d$ .

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$1/RL$		
PI	$0.9/RL$	$L/0.3$	
PID	$1.2/RL$	$2L$	$L/2$

TABLA 4.3.2.1 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR

Por lo general, para sistemas de control de velocidad donde hay ecuaciones de primer orden (por ejemplo los servo eléctricos), se utiliza un controlador PI, y cuando son de orden superior (por ejemplo en los servo hidráulicos) se utiliza un PID.

### 4.3.3 Procedimientos

- Lo primero que se tiene que realizar es el disquete de arranque en Matlab ejecutando el comando *xpcsetup* en la ventana de comandos, luego seleccione la opción *boot disk*, esto iniciará la creación del disquete de arranque.

- Construimos el modelo en *Simulink* del siguiente sistema que se muestra en la figura 4.3.3.1:

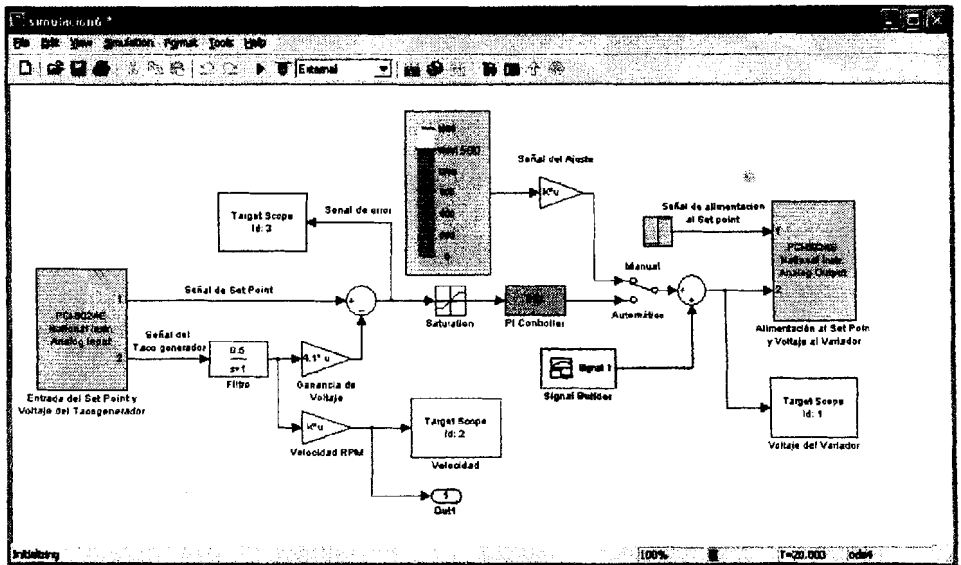


FIGURA 4.3.3.1 SISTEMA EN LAZO ABIERTO

En esta figura se encuentra el sistema de la planta listo para trabajar en modo manual (lazo abierto) y en modo automático (lazo cerrado).

- En bloque de escala desplazable proporciona el valor del *set point*, en la ganancia de ajuste se ingresa un valor que permita la conversión de RPM a voltios, este valor es de  $5.52e-03$ .

- La ganancia de voltaje es para visualizar el voltaje generado por el tacogenerador y su valor es de 4.1, mientras que la ganancia de velocidad muestra el cambio de voltaje a velocidad y su valor es de 735.5.
- Lo que no hay que olvidarse es el tiempo de inicio y parada de la simulación, esto es ingresado en la ventana de *Parámetros de Simulación*, como se muestra en la figura 4.3.3.2.

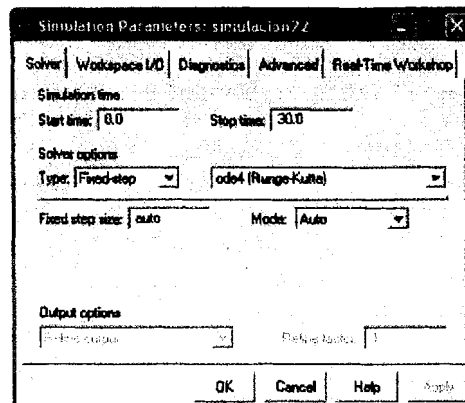


FIGURA 4.3.3.2 PARAMETROS DE SIMULACION

Este tiempo puede ser de 30 segundos.

- El disquete de arranque se utiliza para ejecutar el programa Kernel y establecer la comunicación entre *el Computador Maestro* y *el Computador Remoto*.

- Una vez listo estos ajustes se selecciona la opción *build* para que el sistema en Simulink pueda ser puesto en marcha.
- Ejecutar el comando *xpcrcctool* en la ventana de comandos de Matlab. Desde esta ventana se puede poner en marcha la planta .

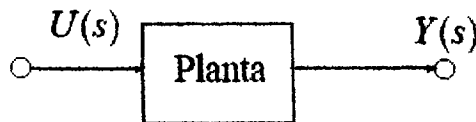


FIGURA 4.3.3.3 SISTEMA EN LAZO ABIERTO

- Llevar manualmente la planta a su punto de operación normal  $y(t) = y_0$  manipulando la entrada  $u(t) = u_0$ . Esto es un  $y(t) = 1500$  RPM.
- Observar la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación.
- En un instante inicial  $t_0$  aplicar un cambio escalón en la entrada, de  $u_0$  a  $u_{\infty}$ , el salto debe de estar entre un 10% a un 20% del valor nominal.



- La gráfica puede ser capturada desde el cuadro de *xpcxrctool*, en el menú *Tool*, allí se selecciona capturar la gráfica que se ve en el Computador Remoto, como se muestra en la figura 4.3.3.4

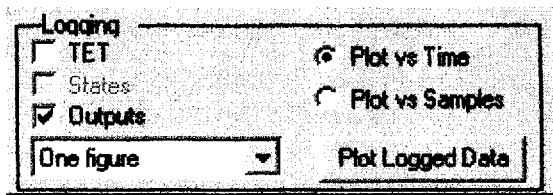


FIGURA 4.3.3.4 SELECCIÓN DE OPCIONES PARA GRAFICAR LA RESPUESTA DEL SISTEMA.

- Obtenemos una gráfica aproximadamente como la mostrada en la figura 4.3.3.5

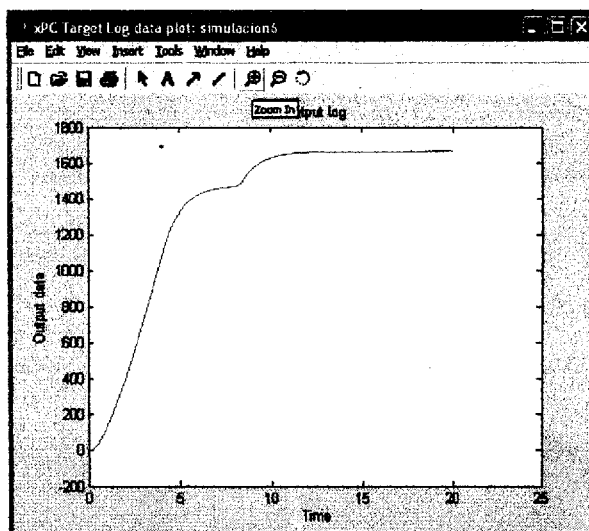


FIGURA 4.3.3.5 RESPUESTA DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO A UNA ENTRADA TIPO ESCALON

- seleccionamos el tramo de curva que es necesario para hallar los parámetros con los siguientes comandos en la ventana de comandos

```
>> wn=tg.outputlog;  
>> time=tg.timelog;  
>> wn=wn(800:1800);  
>> time=time(800:1800);  
>> plot(time,wn)
```

La selección es graficada y se obtiene la siguiente figura de la respuesta del sistema de la planta.

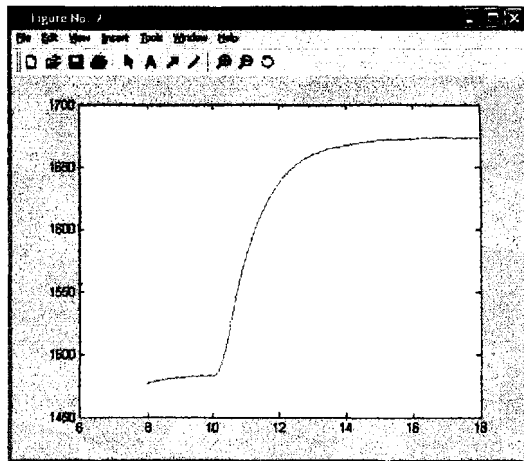


FIGURA 4.3.3.6. CURVA DE RESPUESTA PARA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DEL CONTROLADOR.

De esta manera obtenemos los parámetros  $K$ ,  $\tau$ ,  $R$  y  $L$  mediante la determinación de la recta de máxima pendiente a la curva de respuesta.

De esta gráfica obtenemos los datos de acuerdo a como se muestra en el siguiente gráfico.

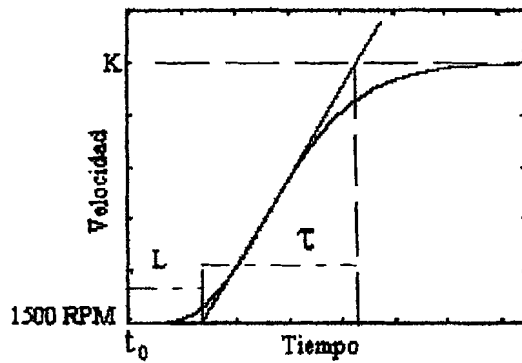


FIGURA 4.3.3.7. PARÁMETROS DE LA CURVA DE RESPUESTA

De esta gráfica los parámetros a encontrar representan:

$K$ :	Ganancia
$\tau$ :	Constante de tiempo
$L$ :	Retardo
$R = K/\tau$ :	Pendiente

#### 4.3.4. Cálculos

Los primeros cálculos que se realizan, es la búsqueda de los parámetros a partir de la curva de reacción para hallar las constantes de integración.

$$\tau = 1.4545 \text{segundos}$$

$$K = 191.67 \text{RPM}$$

$$L = 0.1818 \text{segundos}$$

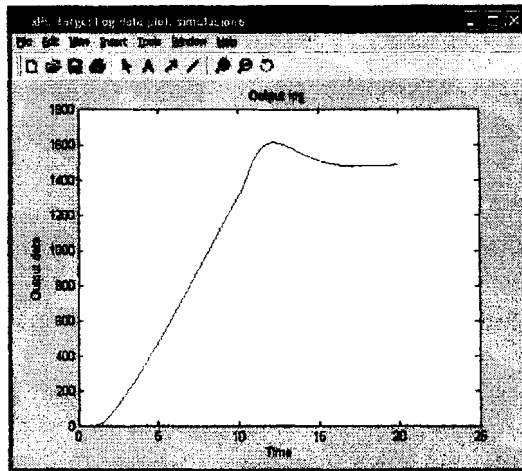
Con estas constantes por medio de la tabla 4.3.2.1 encontramos los parámetros del controlador, siendo para esta planta un controlador PI, debido a que presenta una mejor respuesta en el tiempo al existir perturbaciones en el sistema.

$$R = \frac{K}{\tau} = 131.777$$

$$K_p = \frac{0.9}{RL} = 0.03756$$

$$T_I = \frac{L}{0.3} = 0.606$$

En la figura 4.3.4.1. se observa el comportamiento del sistema frente a una entrada de tipo escalón.



**FIGURA 4.3.4.1. REACCIÓN DE LA PLANTA EN LAZO CERRADO FRENTE A UNA ENTRADA DE TIPO ESCALÓN.**

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente proyecto de graduación se elaboró un sistema controlador de velocidad de un motor trifásico con la ayuda del Software Matlab, donde, el funcionamiento de la planta fue desarrollado de tal manera que empiece primero por ser arrancado en modo manual y luego de alcanzar la estabilidad cambiar a modo automático.

## Conclusiones

- ✓ Los motores trifásicos han empezado a reemplazar a los motores DC, debido a la gran disponibilidad que existe en el mercado, su bajo costo de mantenimiento, su versatilidad y el propio costo del equipo, por ello se optó por la construcción de la planta con un motor de este tipo.
- ✓ Las señales que alimentarán al variador de velocidad serán proporcionadas por el computador Host, y transmitidas al computador Target para que este las emita mientras se controle en forma manual,

una vez pasado a control automático se lo realizará desde la misma planta.

- ✓ La carga de la planta esta representada por una bomba de dirección hidráulica, su funcionamiento es controlado por una llave de paso que se encuentra ubicada en la salida de la red construida, a medida que se cierra dicha llave empieza a incrementarse un torque resistente al movimiento del eje del motor, produciendo de esta manera la perturbación al sistema.
  
- ✓ Si se llegase a dar el caso de cerrar totalmente la llave de paso de la red de circulación de la bomba de dirección hidráulica, se produciría un torque tan resistente que frenaría por completo al motor, lo que produciría un aumento en la corriente del mismo; y, debido a la potencia del motor se activarían las protecciones del variador contra sobre corriente desconectando al mismo hasta lograr recuperar el correcto funcionamiento del mismo.
  
- ✓ El variador de frecuencia cuenta con varias protecciones sobre la corriente y el voltaje, para activarlas basta con ingresar los datos de placa del motor que se va a utilizar, en caso de haber alguna falla

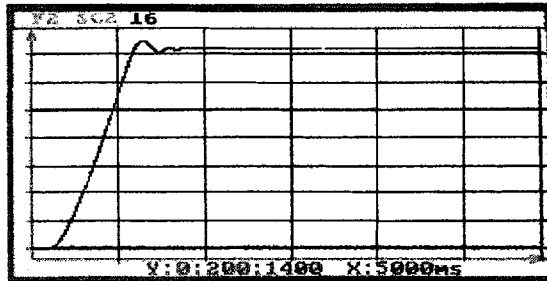
automáticamente actúan sin necesidad de que el operador tenga que incurrir en alguna acción.

- ✓ El ajuste del potenciómetro interno del tacogenerador es a  $6.14K\Omega$ , esto es debido a que en los terminales de salida se desea obtener  $5[V]$ , con la finalidad de que la señal sea manipulada con facilidad por el computador.
- ✓ El Identificador de Sistemas (System Identification), es una herramienta de gran ayuda para encontrar el modelo matemático de cualquier planta, en base a los datos de respuesta del sistema ante una determinada perturbación esta herramienta permite encontrar el modelo más aproximado de la planta, evaluando los datos con los distintos tipos de modelo que posee la misma.
- ✓ El sistema formado por un variador de velocidad y un motor trifásico se comportan como un motor DC, cuyo funcionamiento es parecido al control de velocidad, por control de campo; esto se debe, a que al variador se lo controla con una señal de  $0-10 [V]$ , el mismo que varia en forma proporcional a la velocidad del motor trifásico.

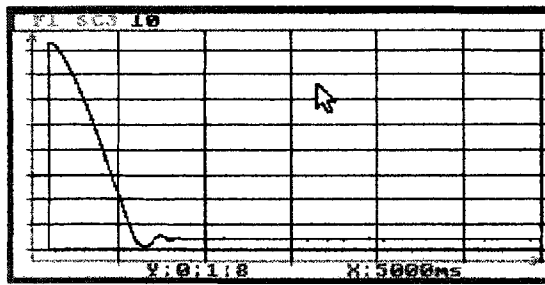


- ✓ Los distintos tipos de controladores son muy necesarios en un proceso, pero cada controlador es personalizado para un determinado sistema o planta.
  
- ✓ En base al modelo matemático de la planta que se obtuvo a través del Identificador de Sistemas, se puede mejorar la respuesta del sistema en la herramienta SISO, seleccionando parámetros como el tiempo de estabilización, el sobre nivel porcentual, etc., es decir de acuerdo a la necesidad del proceso a ser controlado.
  
- ✓ Los tiempos de muestreo en todos los bloques del sistema construido en Simulink deben de ser los mismos, para que el sistema pueda ejecutarse, caso contrario creará conflicto y no permitirá ejecutar el programa.
  
- ✓ Cada uno de los sistemas controladores poseen características propias, los cuales son escogidos para un proceso o sistema que se desee controlar.
  
- ✓ Con un controlador proporcional que permita un error menor al 5% se obtienen oscilaciones en la señal de entrada, lo que hace, que el sistema varíe su velocidad, como se puede apreciar en la gráfica de

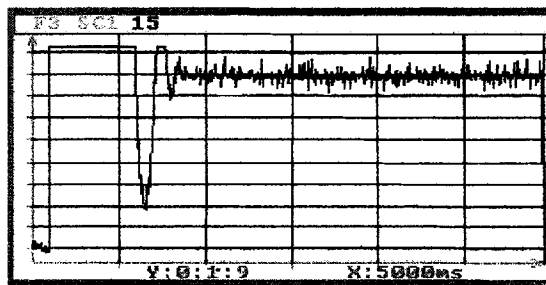
respuesta de la planta con un controlador de constante proporcional  
igual a 161.76.



Velocidad en RPM



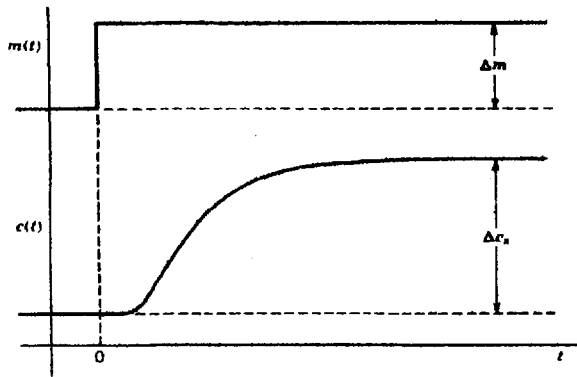
Señal de Error del sistema



Voltaje de entrada al variador

- ✓ En el caso de este proyecto el controlador seleccionado fue PI, debido a que este ofrece un control suave al sistema cuando este recibe alguna perturbación y logra la estabilización en el menor tiempo posible.

- ✓ Existen diversos métodos experimentales para determinar las constantes del sistema controlador, pero su elección depende de la respuesta que proporcione la planta ante una señal escalón unitario.



- ✓ Como la respuesta de la planta es similar a la que presenta el método de Ziegler-Nichols en la figura anterior, se optó por realizar el análisis respectivo basándose en este método.
- ✓ A partir de la curva de respuesta de la planta se obtuvieron las constantes, y con estos valores se obtuvo la ganancia proporcional y el tiempo de integración mediante la tabla 4.3.2.1 que se presentó en el capítulo 4.



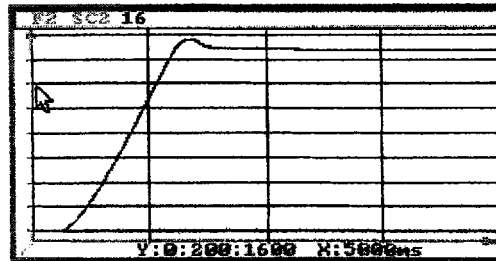
$$R = \frac{K}{\tau} = 131.777$$

$$K_p = \frac{0.9}{RL} = 0.03756$$

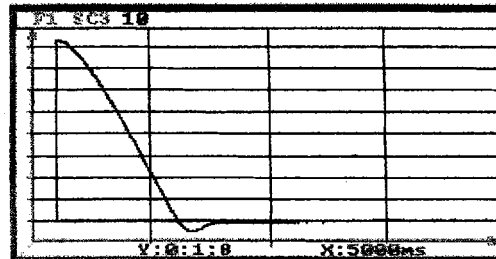
$$T_I = \frac{L}{0.3} = 0.606$$

- ✓ En la determinación de los valores de las constantes de el sistema controlador, una pequeña variación en los mismos por muy pequeña que sea afecta en la estabilidad de la planta, en estos valores los decimales juegan un papel muy importante, ya que por el aumento o disminución en una décima o centésima puede producir la inestabilidad de la planta.
  
- ✓ En el desarrollo del proceso el control de la planta cambia de manual a automático, esta acción deja unas décimas de segundo a la planta sin control, para minimizar el error que se efectúa en esos instantes se adiciona un bloque de saturación antes del controlador.
  
- ✓ El efecto que ocasiona este bloque es minimizar el error que se produce a la entrada del controlador, de esta manera se recupera la estabilidad del sistema sin tener que afectar a las señales de entrada y salida de la planta.

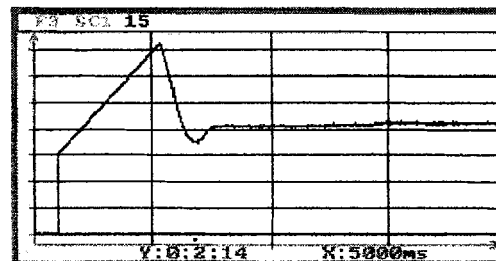
- ✓ Una vez que el controlador PI controla el proceso; es decir, la planta entra en modo automático o lazo cerrado, su respuesta ante una señal perturbadora es rápida, como se muestra en la siguiente figura.



Señal de velocidad en RPM



Señal de error del Sistema



Señal que ingresa al variador

- ✓ A lo largo del desarrollo de este proyecto se pudo determinar, que existen dos tipos de herramientas en las librerías que posee Simulink, unas son útiles para el trabajo de simulación y otras para tiempo real, estas no pueden ser mezcladas, ya que no tendrían un buen desempeño o en su defecto no funcionarían.

- ✓ El programa Simulink es mas empleado para simulaciones en base a función de datos, que pueden ser de un sistema real o de un sistema ficticio; por ejemplo un motor, en el cuadro de diálogo se ubican los valores de resistencia, inductancia y demás. Según sea el tipo de motor que se utiliza, cambia todo los parámetros en función de los datos de un motor real.
  
- ✓ El sistema de computadores Maestro – Remoto (Host –Target) tiene una gran ventaja, esta es que, una vez que la planta ha sido puesta en marcha y bajo la acción del controlador (modo automático), se puede cerrar el programa Matlab sin necesidad de detener la aplicación de control de la planta.
  
- ✓ El controlador sigue realizando su trabajo en forma eficiente. Esto suele hacerse debido a que Matlab es un programa que ocupa una gran cantidad de recursos de la computadora Maestro, para retomar la comunicación con el computador Remoto basta únicamente con abrir nuevamente Matlab y el programa de control de la planta. .

## **Recomendaciones**

- ✓ Es muy necesario conocer el número de señales de entrada y de salida que se van a manejar en el proyecto, y cuantas son de tipo analógicas y cuantas son de tipo digitales, estos son aspectos muy importantes pues según esto se escoge la tarjeta de adquisición de datos para el proceso en tiempo real.
- ✓ Cuando se este procediendo a adquirir el programa de Matlab con la respectiva licencia, verificar con que sistemas se va a trabajar para según eso pedir asistencia a Mathworks y esta pueda dar la licencia de acuerdo a los requerimientos de la planta a construir.
- ✓ Cuando se construye en Simulink trabajos en tiempo real, hay que tener presente, que no, todos los elementos de las librerías pueden ser utilizados para este tipo de trabajos.
- ✓ Al trabajar en la planta es aconsejable no cerrar por completo la llave y obstruir el flujo de aceite, pues para mover la bomba hidráulica el motor tendría que producir un torque que supera su capacidad, razón por la cual el motor se detiene gracias a las protecciones de sobrecorriente del variador de velocidad.

- ✓ No se recomienda variar la programación del variador, ya que esto puede ocasionar variaciones en el comportamiento de planta. Solo debe ser utilizado para encender o apagar el motor, o para observar la variación de frecuencia o consumo de corriente del motor.
  
- ✓ No mover la regulación del potenciómetro que está ubicado en el interior del tacogenerador, pues este ha sido posicionado de tal manera que genere una cantidad específica de voltaje, el cual está considerado dentro de la programación de Simulink.
  
- ✓ En caso de que el potenciómetro del set point se averíe deberá ser remplazado por uno de iguales características, es decir, uno lineal que es lo óptimo e ideal para su función dentro de la planta.
  
- ✓ Al desconectar la alimentación de la planta lo primero que hay que realizar, es presionar el botón de paro de la planta, acto seguido abrir el disyuntor y recién se podrá desconectar la planta. Este procedimiento es algo que debe seguirse tal cual, ya que si no se realiza en la forma indicada puede producir daños en el variador de frecuencia.



- ✓ Desmontar el sistema a controlar en la planta (motor, tacogenerador y bomba hidráulica) en caso de que sea estrictamente necesario, ya que estos se encuentran alineados, y en caso de no estarlo estos producirían mucha vibración a la planta, que puede afectar al variador de velocidad.
  
- ✓ El cambiar los valores de las ganancias de los bloques dentro del sistema construido en Simulink se descontrolaría la planta, debido a que están seleccionadas para acoplar las señales y que la planta trabaje con normalidad.
  
- ✓ Para cambiar de manual a automático en la planta el error debe de disminuir o volverse casi cero, para esto se posiciona el mismo valor de velocidad ubicado en el ajuste de la programación en Simulink, en el set point localizado en la planta.
  
- ✓ Si por algún motivo se desconectan los cables que lleva la señal del tacogenerador, que se los vuelva a conectar en ese mismo orden, ya que si esto no ocurriese la señal estaría invertida, es decir, el controlador vería una señal negativa con lo cual la planta estaría fuera de control.

- ✓ Para manipular el variador de frecuencia debe esperarse por lo menos 5 minutos después de que este fuese desconectado. Cuando el variador este encendido no es aconsejable desmontar el panel de programación, ya que esto es algo que puede afectar el normal desempeño del variador, anulando su programación.
  
- ✓ Tener presente que al seleccionar los canales de entrada o salida, hay que colocar en el bloque conector un número menos que el seleccionado en el bloque de Simulink, estos son procedimientos que están establecidos por MathWorks.
  
- ✓ Cada vez que se trabaje en el modo externo, que es el modo para trabajar en tiempo real hay que generar la codificación del sistema construido en Simulink, ya que caso contrario ocurre un error y el sistema no trabaja.
  
- ✓ De igual manera cuando se quiere cambiar algún valor en los parámetros de los osciloscopios o de otro elemento que no sea una ganancia o valor de una función de transferencia, el sistema debe de estar desconectado o detenido para luego mandar a generar la codificación del sistema y que los cambios se realicen tanto en el computador maestro como en el computador remoto.

- ✓ Tener bien presente los cambios que se realizan en cualquiera de los menú o submenús de los bloques del sistema construido en Simulink, debido a que cualquier cambio en ello afecta a la planta.
- ✓ Los proyectos pueden ser mejorados, pero para ello se necesita que la tarjeta de adquisición de datos posea mas salidas analógicas de las que tiene la tarjeta PCI-6024E de National Instruments, la cual posee solo dos salidas analógicas y limita las posibilidades de ampliar el alcance del proyecto.

**ANEXOS**

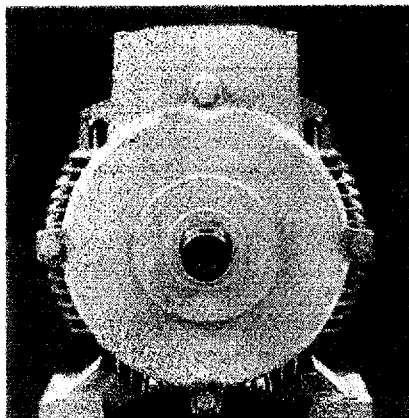
# **ANEXO 1**

## **MOTOR TRIFASICO**

El modelo de motor escogido para este proyecto, esta homologado universalmente, cumpliendo con las exigentes demandas técnicas del mercado, a continuación se presenta las características que identifican esta nueva serie de motores:

### **1. CARCASA**

El diseño es unificado con aletas desde el tamaño 71 hasta el 160, debido a esto posee una mayor conductividad térmica y por lo tanto una mejor refrigeración, como se muestra en la figura 1.



**FIGURA 1. CARCASA DEL MOTOR TRIFASICO**

Tiene patas integradas diseñadas para soportar esfuerzos mecánicos exigentes, a demás presenta una pieza intermedia integrada a la carcasa,

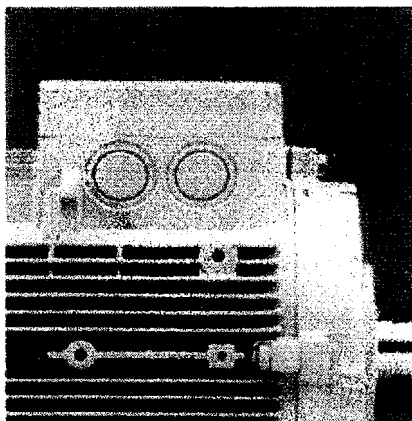
la placa es de acero inoxidable y presenta bornes de conexión para puesta a tierra.

## **2. PLATILLOS**

Con un nuevo diseño, más robustos y funcionales garantizan un perfecto desempeño ante exigencias mecánicas extremas.

## **3. CAJA DE TERMINALES**

Esta ubicada en la parte superior, la entrada de los cables de la acometida es por los lados, presenta borneras de conexión, lo que facilita su manejo, como se muestra en figura 2.



**FIGURA 2. CAJA DE TERMINALES**

Esta caja es amplia y cómoda, lo que permite que se realicen cambios de conexiones técnicamente más seguras.

#### **4. RODAMIENTOS**

Los rodamientos son tipo rígido de bolas, tienen doble sello y con juego interno C3, libres de mantenimiento, con una vida útil de hasta 20.000 horas de servicio continuo.

#### **5. PROTECCION MECANICA**

Con retenedores tipo CD ring en los platillos (AS y BS), el nuevo diseño de la caperuza, aumenta considerablemente la protección del ventilador contra contactos involuntarios. Se encuentra protegido contra chorros de agua en cualquier dirección y contra depósitos de polvo (IP55).

#### **6. SISTEMA DE AISLAMIENTO TROPICALIZADO**

De la misma manera que para las anteriores series SIEMENS, el sistema de aislamiento utilizado en esta nueva serie, es apto para usarse con variadores de velocidad, nuestros materiales aislantes y su comportamiento térmico, nos permite garantizar un f.s. de 1.15 para

potencias normalizadas, todos nuestros materiales utilizados en la nueva serie, son clase F.

## 7. TENSIONES DE FUNCIONAMIENTO, RENDIMIENTO Y VENTAJAS.

La línea estándar tiene tensión conmutable 220/440, 60Hz, todos los motores de la nueva serie disminuyen el nivel de ruido. Con este nuevo diseño se ofrece mayor rendimiento, ahorrando energía, diseño moderno, versátil y modular, motor robusto y libre de mantenimiento.

## 8. DIMENSIONES DEL MOTOR TRIFASICO

Dentro de las diferentes series que se encuentran disponibles en OTESA, están los modelos 71 a 160 y presentan las siguientes dimensiones como se muestra en la figura 3, y en la tabla 1.

### Ejecución IMB3

TC 71 a 160

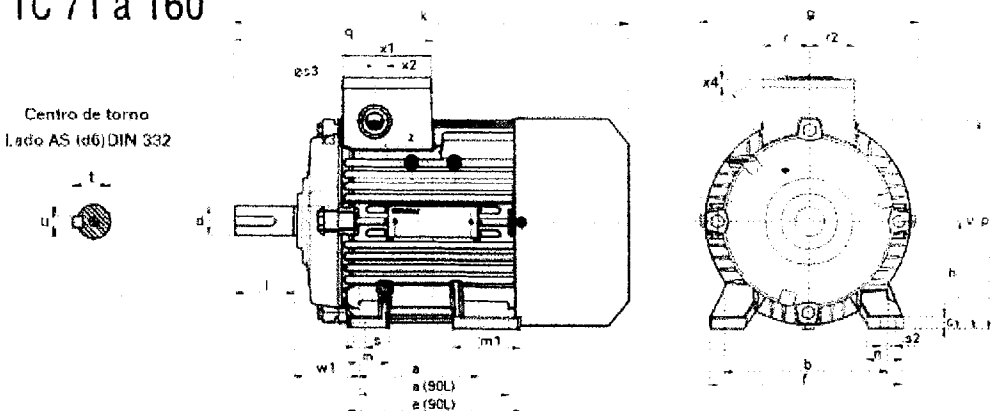


FIGURA 3. DIMENSIONES DEL MOTOR TRIFASICO



Medidas para montaje (Dimensiones en m.m.)

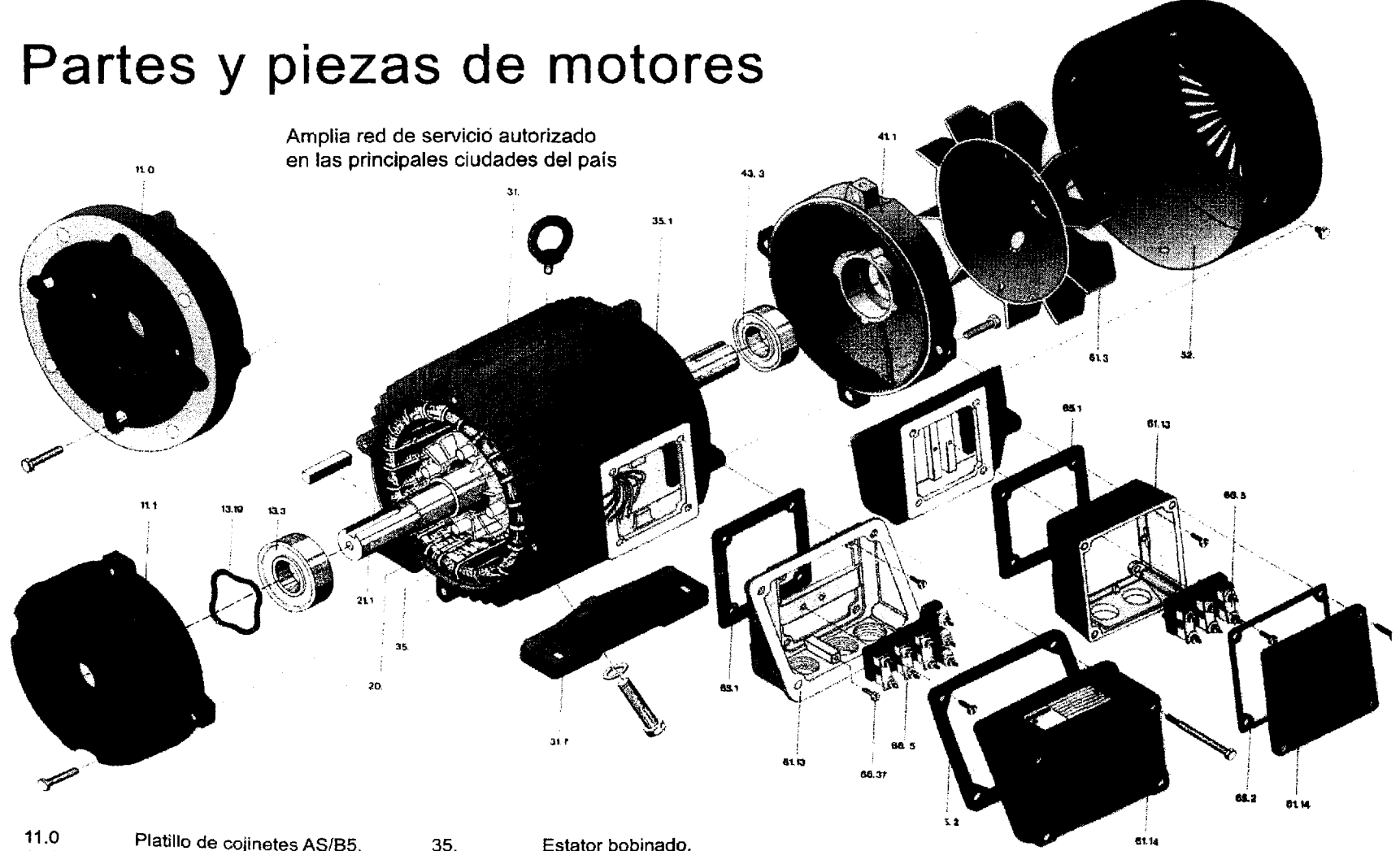
Motor tamaño	Medidas comunes (IM B3, IM B5)						Medidas de la forma constructiva IM B3										Medidas de la forma constructiva IM B5 / IM B35						
	l	d	t	u	g	g <sub>1</sub>	p/p <sub>2</sub>	k	a	b	h	w <sub>1</sub>	s	e	f	a1	b1	c1	e1	f1	s1	k	
	071	30	14	16.1	5	148	-	178.5	240	90	112	71	45	7	107.5	132	160	110	5.5	130	3.5	10.5	231
080	40	19	21.3	8	163	-	193.5	273.5	100	125	88	50	9.3	118.5	150	200	130	6	165	3.5	13	283	
090 S	50	24	26.9	8	181	-	211.5	331	100	140	90	56	10	144.5	165	200	130	7	165	3.5	13	324	
090 L	50	24	26.9	8	181	-	211.5	331	125	140	90	56	10	144.5	165	200	130	7	165	3.5	13	324	
112 M	60	28	31.0	8	227	-	260	393	140	190	112	70	12	178	226	250	180	11	215	4	14.5	388	
132 S	80	38	41.3	10	264.5	-	315	481	140	216	132	69	12	218	256	300	230	14	265	4	15	481	
132 M	80	38	41.3	10	264.5	-	315	481	178	216	132	69	12	218	256	300	230	14	265	4	15	481	
160 M	110	42	45.0	12	320	-	365.5	629	254	254	160	109	15	300	300	350	250	20	300	5	18	629	
160 L	110	42	45.0	12	320	-	365.5	629	254	254	160	109	15	300	300	350	250	20	300	5	18	629	
180 M	110	48	51.5	14	357	499	410	653	241	279	180	121	16	339	339	350	250	13	300	5	18	653	
180 L	110	48	51.5	14	357	499	410	691	279	279	180	121	16	339	339	350	250	13	300	5	18	691	
200 L	110	56	59.0	18	403	534	480	743	305	318	200	133	20	385	398	400	300	15	350	5	18	743	
225 S	*140	*60	*64	18	447	-	569	*830	286	356	225	149	19	361	436	450	350	16	400	5	17.5	*830	
225 M	*140	*60	*64	18	447	-	569	*830	311	356	225	149	19	361	436	450	350	16	400	5	17.5	*830	
250 M	140	*65	*69	18	520	-	680	930	349	406	250	168	24	409	508	550	450	18	500	5	17.5	930	
280 S	140	*75	*79.5	*20	575	-	735	1005	366	457	280	190	24	479	557	550	450	18	500	5	17.5	1005	
280 M	140	*75	*79.5	*20	575	-	735	1005	419	457	280	190	24	479	557	550	450	18	500	5	17.5	1005	

\* Para motores de dos polos cambian las siguientes medidas:  
 Tamaño constructivo 225 M: l=110; d=55; t=59; u=16 mm.; k=800.  
 Tamaño constructivo 250 M: d=60; t=64  
 Tamaño constructivo 280 S: d=65; t=69; u=18 mm.

**TABLA 1. DIMENSIONES DEL MOTOR TRIFÁSICO**

# Partes y piezas de motores

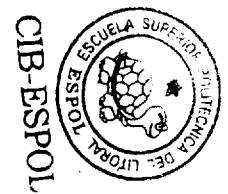
Amplia red de servicio autorizado  
en las principales ciudades del país



- 11.0 Platillo de cojinetes AS/B5.
- 11.1 Platillo de cojinetes AS/B3.
- 13.3 Balineras AS.
- 13.19 Arandela de presión.
- 20. Rotor completo.
- 21.1 Eje.
- 31. Carcasa.
- 31.7 Pata.

- 35. Estator bobinado.
- 35.1 Número de fabricación grabado.
- 41.1 Platillo de cojinetes BS.
- 43.3 Balineras BS.
- 51.3 Ventilador.
- 52. Caperuza.
- 61.13 Pieza intermedia.
- 61.14 Tapa caja bornes.

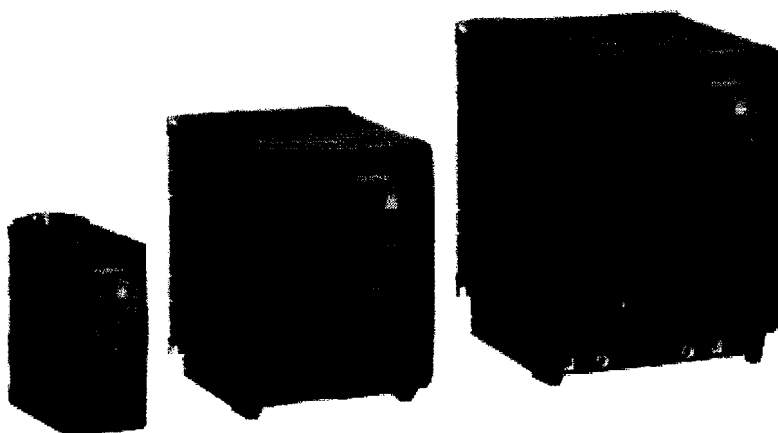
- 65.1 Empaque interno.
- 65.2 Empaque tapa.
- 66.5 Regleta de bornes.
- 66.37 Tornillo de puesta a tierra.



## **ANEXO 2**

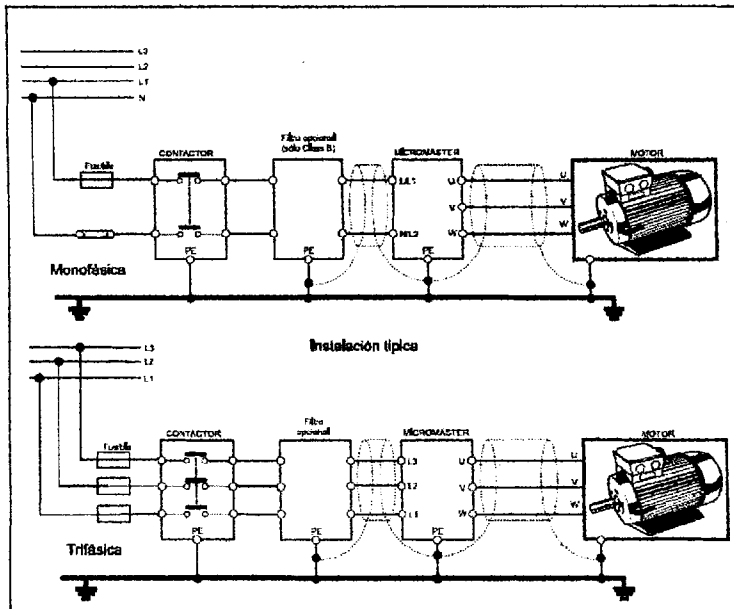
### **VARIADOR DE VELOCIDAD MICROMASTER 420**

El modelo de variador Micromaster 420 de SIEMENS, es una gama de convertidores de frecuencia utilizados para variar la velocidad de motores trifásicos, los mismos que abarcan desde entrada monofásica de 120 W hasta trifásica de 11 kW.



Los convertidores de frecuencia son controlados por microprocesadores que utilizan tecnología IGBT (Insulated Gated Bipolar Transistor). Las conexiones de red y del motor deben realizarse tal y como se muestra en la siguiente figura.

Los convertidores han sido diseñados para funcionar en un entorno industrial cargado con grandes interferencias electromagnéticas. Normalmente, unas buenas prácticas de instalación aseguran un funcionamiento seguro y libre de perturbaciones



Estas conexiones son tanto para alimentación monofásica como trifásica. Hay que tener en cuenta que para manipular el convertidor de frecuencia una vez detenido el funcionamiento hay que esperar 5 minutos.

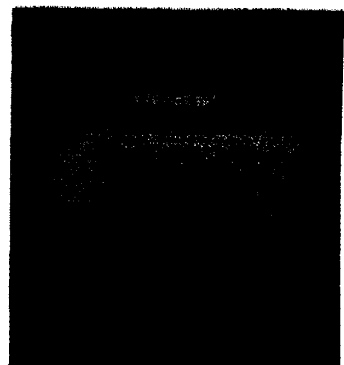
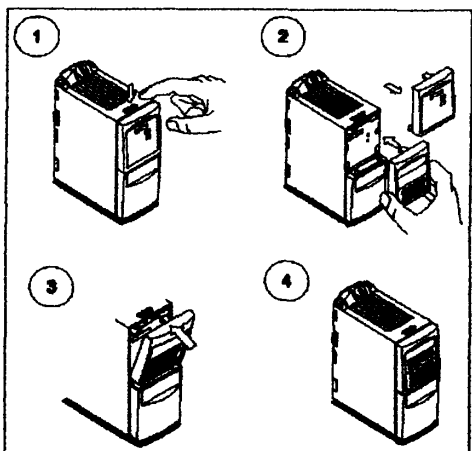
Con ajustes por defecto realizados en fábrica, el Micromaster 420 es ideal para una gran gama de aplicaciones de control de motores.

Para aplicaciones más complejas puede utilizárselo haciendo uso de su extensa lista de parámetros, a los cuales accedemos por medio del BOP (Basic Operator Panel) o del AOP (Advanced Operator Panel).

Mediante el BOP se pueden modificar los valores de los parámetros. Para parametrizar con el BOP se debe retirar el SDP que es el panel frontal con el que originalmente viene el Micromaster 420.

El BOP contiene una pantalla de siete segmentos en la que se muestran los números y valores de parámetros, mensajes de alarma y de fallo así como valores de consigna así como valores reales.

No es posible el almacenamiento de información de parámetros con el BOP. El panel BOP es muy sencillo de colocar, se coloca tal como se muestra en la siguiente figura.



## **CARACTERÍSTICAS**

### **Características Principales**

Entre las características más relevantes del Micromaster 420 se tiene las siguientes:

- Fácil de instalar .
- Puesta en Marcha sencilla.
- Puede funcionar en alimentación de línea IT.
- Tiempo de respuesta a señales de mando rápido y repetibles.
- Amplio número de parámetros que permiten configuraciones para cubrir una gran gama de aplicaciones.
- Diseño modular para configuración extremadamente flexible.
- Altas frecuencias de pulsación para funcionamiento silencioso del motor.
- Opciones externas para comunicación por PC, panel BOP, panel AOP y módulo de comunicación PROFIBUS.

## **Características de Prestaciones**

- **Flux Current Control (FCC)** para respuesta dinámica y control de motor mejorados.
- **Fast Current Limitation (FCL)** para funcionamiento con mecanismo exento de disparo.
- **Freno por inyección de corriente integrado.**
- **Tiempos de aceleración/deceleración con redondeo de rampa programable.**
- **Regulación usando función de lazo de regulación proporcional e integral (PI).**
- **Características V/f multipunto.**

## **Características de protección**

- **Protección de sobretensión /mínima tensión.**
- **Protección de sobretemperatura para el convertidor.**
- **Protección de defecto a tierra.**
- **Protección de cortocircuito.**
- **Protección térmica del motor por  $i^2t$ .**
- **Protección del motor mediante sondas PTC/KTY.**

A continuación se muestra una tabla de características de trabajo:

Característica	Especificación
Tensión de red en servicio y Márgenes de potencia	1 AC 200 V a 240 V $\pm$ 10 %    0,12 kW – 3,0 kW    (0,16 hp – 4,0 hp) 3 AC 200 V a 240 V $\pm$ 10 %    0,12 kW – 5,5 kW    (0,16 hp – 7,5 hp) 3 AC 380 V a 480 V $\pm$ 10 %    0,37 kW – 11,0 kW    (0,50 hp – 15,0 hp)
Frecuencia de entrada	47 Hz a 63 Hz
Frecuencia de salida	0 Hz a 650 Hz
Factor de potencia	$\geq$ 0,7
Rendimiento del convertidor	96 % a 97 %
Capacidad de sobrecarga	50 % de sobrecarga durante 60 s en un periodo de 5 min referido a la corriente nominal de salida
Corriente al conectar	Inferior a la corriente nominal de entrada
Método de control	Control V/f lineal; Control V/f lineal con Flux Current Control (FCC); U Control V/f cuadrático; Control V/f multipunto
Frecuencia de pulsación	2 kHz a 16 kHz (en pasos de 2 kHz)
Frecuencias fijas	7, parametrizable
Frecuencias inhibibles	4, parametrizable
Resolución de consigna	0,01 Hz digital, 0,01 Hz serie, 10 bits analógica (potenciómetro motorizado 0.1 Hz (0.1% (en modo PID)))
Entradas digitales	3, parametrizable (libre de potencia), conmutables entre activa con high/activa con low (PNP/NPN)
Entrada analógica	1, para valor de consigna o entrada PI (0 V a 10 V, escalable o utilizable como 4ª entrada digital)
Salida de relé	1, parametrizable DC 30 V / 5 A (carga resistiva), AC 250 V / 2 A (carga inductiva)
Salida analógica	1, parametrizable (0 mA a 20 mA)
Interface serie	RS-485, opción RS-232
Compatibilidad electromagnética	Filtros EMC opcionales según EN55011, clase A o B, también hay disponibles filtros clase A internos
Frenado	Frenado por inyección de c.c., frenado combinado
Grado de protección	IP20
Margen de temperatura	-10 °C a +50 °C (-14 °F a 122 °F)
Temperatura almacenamiento	-40 °C a +70 °C (-40 °F a 158 °F)
Humedad relativa	< 95 % (sin condensación)
Altitud de operación	hasta 1000 m sobre el nivel del mar sin necesidad de reducción de potencia
Características de protección	Mínima tensión, sobretensión, sobrecarga, defecto a tierra, cortocircuito, protección busculante, protección de bloqueo del motor, sobretemperatura en motor, sobretemperatura en convertidor, bloqueo de parámetros
Normas	UL, cUL, CE, C-lick
Marcado CE	de acuerdo con las directivas europeas "Baja tensión" 73/23/CEE y "Compatibilidad electromagnética" 89/336/CEE

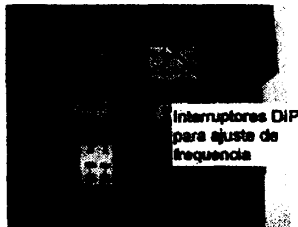


A continuación se muestra una tabla de características de trabajo:

Característica	Especificación
Tensión de red en servicio y Márgenes de potencia	1 AC 200 V a 240 V $\pm$ 10 %    0,12 kW – 3,0 kW    (0,16 hp – 4,0 hp) 3 AC 200 V a 240 V $\pm$ 10 %    0,12 kW – 5,5 kW    (0,16 hp – 7,5 hp) 3 AC 380 V a 480 V $\pm$ 10 %    0,37 kW – 11,0 kW    (0,50 hp – 15,0 hp)
Frecuencia de entrada	47 Hz a 63 Hz
Frecuencia de salida	0 Hz a 650 Hz
Factor de potencia	$\geq$ 0,7
Rendimiento del convertidor	96 % a 97 %
Capacidad de sobrecarga	50 % de sobrecarga durante 60 s en un período de 5 min referido a la corriente nominal de salida
Corriente al conectar	Inferior a la corriente nominal de entrada
Método de control	Control V/f lineal; Control V/f lineal con Flux Current Control (FCC); U Control V/f cuadrático; Control V/f multipunto
Frecuencia de pulsación	2 kHz a 16 kHz (en pasos de 2 kHz)
Frecuencias fijas	7, parametrizable
Frecuencias inhibibles	4, parametrizable
Resolución de consigna	0,01 Hz digital, 0,01 Hz serie, 10 bits analógica (potenciómetro motorizado 0.1 Hz [0.1% (en modo PID)])
Entradas digitales	3, parametrizable (libre de potencial), conmutables entre activa con high/activa con low (PNP/NPN)
Entrada analógica	1, para valor de consigna o entrada PI (0 V a 10 V, escalable o utilizable como 4ª entrada digital)
Salida de relé	1, parametrizable DC 30 V / 5 A (carga resistiva), AC 250 V / 2 A (carga inductiva)
Salida analógica	1, parametrizable (0 mA a 20 mA)
Interface serie	RS-485, opción RS-232
Compatibilidad electromagnética	Filtros EMC opcionales según EN55011, clase A o B, también hay disponibles filtros clase A internos
Frenado	Frenado por inyección de c.c., frenado combinado
Grado de protección	IP20
Margen de temperatura	-10 °C a +50 °C (-14 °F a 122 °F)
Temperatura almacenamiento	-40 °C a +70 °C (-40 °F a 158 °F)
Humedad relativa	< 95 % (sin condensación)
Altitud de operación	hasta 1000 m sobre el nivel del mar sin necesidad de reducción de potencia
Características de protección	Mínima tensión, sobretensión, sobrecarga, defecto a tierra, cortocircuito, protección basculante, protección de bloqueo del motor, sobretemperatura en motor, sobretemperatura en convertidor, bloqueo de parámetros
Normas	UL, cUL, CE, C-tick
Marcado CE	de acuerdo con las directivas europeas "Baja tensión" 73/23/CEE y "Compatibilidad electromagnética" 89/336/CEE

## **Puesta en marcha**

Lo primero que hay que verificar es el estado de los interruptores DIP, con los cuales se selecciona la frecuencia de la red de alimentación, esto se lo realiza de la siguiente forma:



- **Interruptor DIP2:**
  - **Posición Off:**  
**Ajustes europeos por defecto (50 Hz, kW, etc.)**
  - **Posición On:**  
**Ajustes norteamericanos por defecto (60 Hz, hp, etc.)**
- **Interruptor DIP1:**
  - **No para uso del cliente.**

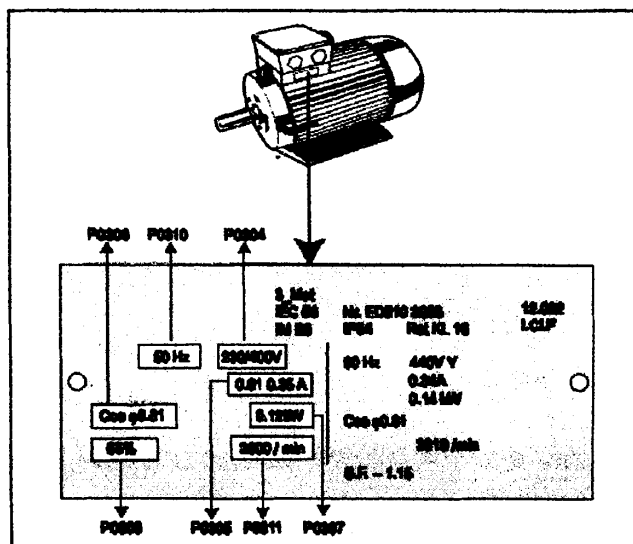
Para poder arrancar el motor se necesita que las instalaciones eléctricas y mecánicas estén completas y los interruptores DIP en su correcta posición de acuerdo a la frecuencia de trabajo.

Para poder realizar un arranque con el BOP hay que primero desbloquear las funciones de control del motor del BOP que por defecto vienen










bloqueadas. Los ajustes por defecto que hay que realizar para arrancar el motor por medio del BOP son:

Parámetro	Significado	Por defecto Europa (Norteamérica)
P0100	Modo operación Europa/USA	50 Hz, kW (60Hz, hp)
P0307	Potencia del motor	Las unidades (kW o Hp) dependen del ajuste de P0100. [valor dependiente de la variante.]
P0310	Frecuencia del motor	50 Hz (60 Hz)
P0311	Velocidad del motor	1395 (1680) rpm [dependiendo de la variante]
P1082	Frecuencia máxima del motor	50 Hz (60 Hz)

En estos lo que realizamos es el ingreso de los datos del motor para que el convertidor de frecuencia se adapte al tipo de motor que va a controlar. Los datos normales que tenemos del motor para la parametrización son los que se muestran a continuación.












Los botones que posee el BOP para su manejo y programación con una breve descripción de cada uno de ellos se muestran a continuación.

Panel/Botón	Función	Efectos
	Indicación de estado	La pantalla de cristal líquido muestra los ajustes actuales del convertidor.
	Marcha	Al pulsar este botón se arranca el convertidor. Por defecto está bloqueado este botón. Para habilitar este botón, ajustar P0700 = 1.
	Parada	OFF1 Pulsando este botón se para el motor siguiendo la rampa de desaceleración seleccionada. Por defecto está bloqueado; para habilitarlo, ajustar P0700 = 1. OFF2 Pulsando el botón dos veces (o una vez prolongada) el motor se para de forma natural (inercia hasta parada).
	Invertir sentido	Pulsar este botón para cambiar el sentido de giro del motor. El inverso se indica mediante un signo negativo (-) o un punto decimal intermitente. Por defecto está bloqueado; para habilitarlo, ajustar P0700 = 1.
	Jog motor	Pulsando este botón mientras el convertidor se tiene salida hace que el motor arranque y gire a la frecuencia Jog preestablecida. El motor se detiene cuando se suelta el botón. Pulsar este botón cuando el motor está funcionando carece de efecto.
	Funciones	Este botón sirve para visualizar información adicional. Funciona pulsándolo y manteniéndolo apretado. Muestra lo siguiente comenzando por cualquier parámetro dentro la opción: 1. Tensión en circuito intermedio (indicado mediante d - unidades en V). 2. Corriente de salida (A). 3. Frecuencia de salida (Hz). 4. Tensión de salida (v - unidades en V). 5. El valor seleccionado en P0005. (Si P0005 se ha configurado de tal forma que se muestra uno de los datos indicados arriba (2,4 ó 5), se aparece el valor correspondiente de nuevo). Cualquier pulsación adicional hace que vuelva a visualizarse la sucesión indicada anteriormente. <b>Función de salto</b> Pulsando brevemente el botón Fn es posible saltar desde cualquier parámetro (P000X o PXXXX) a r0000, lo que permite, si se desea, modificar otro parámetro. Una vez atornillado a r0000, si pulsa el botón Fn irá de nuevo a su punto inicial.
	Acceder a parámetros	Pulsando este botón es posible acceder a los parámetros.
	Subir valor	Pulsando este botón se sube el valor visualizado. Para cambiar la consigna de frecuencia vía el panel BOP, ajustar P1800 = 1.
	Bajar valor	Pulsando este botón se baja el valor visualizado. Para cambiar la consigna de frecuencia vía el panel BOP, ajustar P1800 = 1.







No es posible realizar el cambio de los parámetros del variador hasta ajustar P0010 = 1, y se debe volver a colocar P0010 = 0 una vez realizado el cambio de parámetros para poder realizar la puesta en marcha.


Los botones que posee el BOP para su manejo y programación con una breve descripción de cada uno de ellos se muestran a continuación.

Paralelo/botón	Función	Efectos
	Indicación de estado	La pantalla de cristal líquido muestra las ajustes actuales del convertidor.
	Marcha	Al pulsar este botón se arranca el convertidor. Por defecto está bloqueado este botón. Para habilitar este botón, ajustar P0700 = 1.
	Parada	OFF1 Pulsando este botón se para el motor siguiendo la rampa de desaceleración seleccionada. Por defecto está bloqueado; para habilitarlo, ajustar P0700 = 1. OFF2 Pulsando el botón dos veces (o una vez prolongada) el motor se para de forma natural (inercia hasta parada).
	Invertir sentido	Pulsar este botón para cambiar el sentido de giro del motor. El inverso se indica mediante un signo negativo (-) o un punto decimal intermitente. Por defecto está bloqueado; para habilitarlo, ajustar P0700 = 1.
	Jog motor	Pulsando este botón mientras el convertidor no tiene salida hace que el motor arranque y gire a la frecuencia Jog predefinida. El motor se detiene cuando se suelta el botón. Pulsar este botón cuando el motor está funcionando causa de efecto.
	Funciones	Este botón sirve para visualizar información adicional. Funciona pulsándolo y manteniéndolo apretado. Muestra lo siguiente comenzando por cualquier parámetro durante la operación: 1. Tensión en circuito intermedio (indicado mediante d - unidades en V). 2. Corriente de salida (A) 3. Frecuencia de salida (Hz) 4. Tensión de salida (v - unidades en V). 5. El valor seleccionado en P0005. (Si P0005 se ha configurado de tal forma que se muestre uno de los datos indicados arriba (2,4 ó 5), se aparece el valor correspondiente de nuevo). Cualquier pulsación adicional hace que vuelva a visualizarse la sucesión indicada anteriormente. Función de salto Pulsando brevemente el botón Fn es posible saltar desde cualquier parámetro (XXXX o PXXXX) a r0000, lo que permite, si se desea, modificar otro parámetro. Una vez retornado a r0000, al pulsar el botón Fn irá de nuevo a su punto inicial.
	Acceder a parámetros	Pulsando este botón es posible acceder a los parámetros.
	Subir valor	Pulsando este botón se sube el valor visualizado. Para cambiar la consigna de frecuencia vía el panel BOP, ajustar P1000 = 1.
	Bajar valor	Pulsando este botón se baja el valor visualizado. Para cambiar la consigna de frecuencia vía el panel BOP, ajustar P1000 = 1.

No es posible realizar el cambio de los parámetros del variador hasta ajustar P0010 = 1, y se debe volver a colocar P0010 = 0 una vez realizado el cambio de parámetros para poder realizar la puesta en marcha.

**Para cambiar los parámetros se realizan los siguientes pasos:**

1. Pulsar  para acceder a parámetros.
2. Pulsar  hasta que se visualice el parámetro requerido.
3. Pulsar  para acceder al nivel del valor del parámetro.
4. Pulsar  ó  hasta el valor requerido para el parámetro seleccionado.
5. Pulsar  para confirmar y guardar el valor del parámetro.
6. Solo los parámetros de mando son visibles al usuario.

En algunas ocasiones al cambiar valores de parámetros la pantalla del BOP puede mostrar . eso es porque el convertidor esta ocupado en tareas de mayor prioridad.

En el siguiente cuadro se muestran el orden de cambio de parámetros en el convertidor para una puesta en servicio rápida es decir arrancar el motor en una aplicación sencilla controlándolo desde el BOP.

**P0010 Comenzar puesta en servicio rápida**  
0 Listo para Marcha  
1 Puesta en servicio rápida  
30 Ajustes de fábrica  
**Nota**  
Hay que volver a poner el P0010 a '0' antes de arrancar el motor. Sin embargo, si está ajustado P3000 = 1 después de la puesta en servicio, esto se realiza automáticamente.

**P0100 Funcionamiento para Europa/ Norteamérica**  
0 Potencia en kW; f por defecto 50 Hz  
1 Potencia en hp; f por defecto 60 Hz  
2 Potencia en kW; f por defecto 60 Hz  
**Nota**  
Los ajustes a 0 y 1 se deberían cambiar mediante los interruptores DIP para que el ajuste sea permanente.

**P0304 Tensión nominal del motor<sup>1)</sup>**  
10 V - 2000 V  
Tensión nominal del motor (V) de la placa de características

**P0305 Corriente nominal del motor<sup>1)</sup>**  
0 - 2 x corriente nominal del convertidor (A)  
Corriente nominal del motor (A) de la placa de características

**P0307 Potencia nominal del motor<sup>1)</sup>**  
0 kW - 2000 kW  
Potencia nominal del motor (kW) de la placa de características.  
Si P0100 = 1, los valores serán en hp

**P0310 Frecuencia nominal del motor<sup>1)</sup>**  
12 Hz - 650 Hz  
Frecuencia nominal del motor (Hz) de la placa de características

**P0311 Velocidad nominal del motor<sup>1)</sup>**  
0 - 40000 1/min  
Velocidad nominal del motor (rpm) de la placa de características

**P0700 Selección de la fuente de comandos<sup>2)</sup>**  
(on / off / reverse)  
0 Ajuste de fábrica  
1 Panel BOP  
2 Bornes / entradas digitales

**P1000 Selección de la consigna de frecuencia<sup>2)</sup>**  
0 Sin consigna de frecuencia  
1 Control de frecuencia BOP ↑↓  
2 Consigna analógica

**P1000 Frecuencia mínima del motor**  
Ajusta la frecuencia mínima del motor (0-650Hz) a la que girará el motor con independencia de la consigna de frecuencia. El valor aquí ajustado es válido tanto para giro a derechas como a izquierdas.

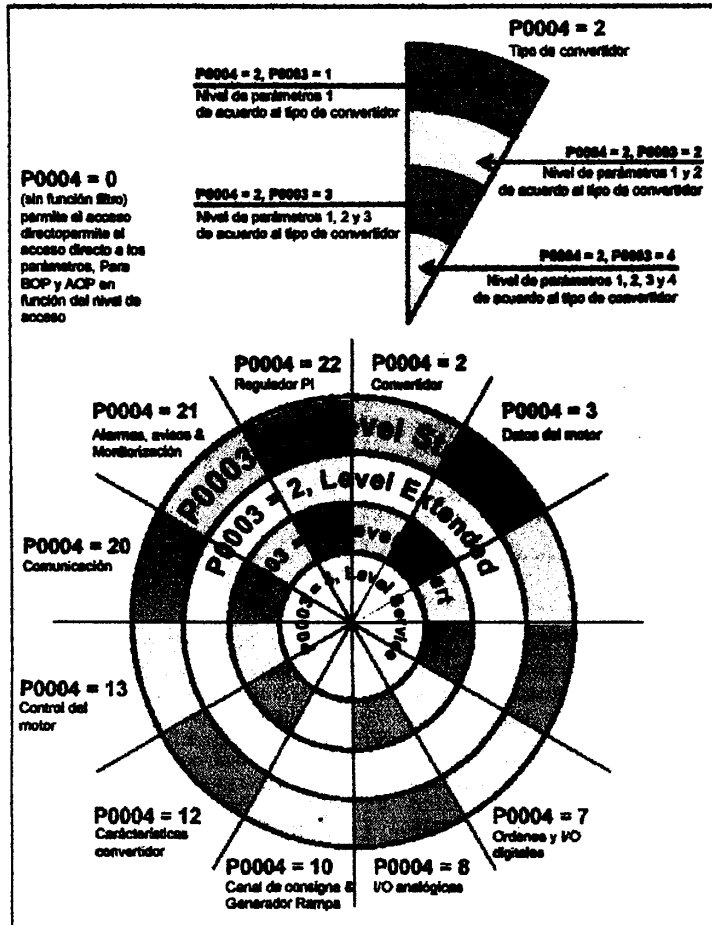
**P1002 Frecuencia máxima del motor**  
Ajusta la frecuencia máxima del motor (0-650Hz) a la que girará el motor con independencia de la consigna de frecuencia. El valor aquí ajustado es válido tanto para giro a derechas como a izquierdas.

**P1120 Tiempo de aceleración**  
0 s - 650 s  
Tiempo que tarda el motor para acelerar desde el estado de reposo hasta la frecuencia máxima del motor.

**P1121 Tiempo de deceleración**  
0 s - 650 s  
Tiempo que tarda el motor para decelerar desde la máxima frecuencia del motor hasta el estado de reposo.

**P3000 Fin de la puesta en servicio rápida**  
0 Finaliza la puesta en servicio rápida basándose en los ajustes actuales (sin cálculo del motor).  
1 Finaliza la puesta en servicio rápida basándose en los ajustes de fábrica (con cálculo del motor)  
2 Finaliza la puesta en servicio rápida basándose en los ajustes actuales (con cálculo del motor y reseteo de E/S).  
3 Finaliza la puesta en servicio rápida basándose en los ajustes actuales (con cálculo de motor, sin reseteo de E/S).

Existen mas posibilidades de configuración de las que se listan en el cuadro anterior. Para otras posibilidades se tienen que revisar las siguiente tablas de parámetros:



En este cuadro se puede ver el nivel de acceso que podemos tener en los parámetros del convertidor solo con variar el P0003 y otros parámetros adicionales con solo variar el valor de P0004, pero esto depende de la



aplicación que queramos realizar, lo cual se pone a consideración del operador.

El Micromaster 420 puede presentar fallos y alarmas, cuyos códigos se detallan a continuación en cuadros.


### Códigos de errores

Error	Causa	Diagnóstico & Eliminar	Reacción
<b>F0001</b> Sobrecorriente	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Potencia del Motor (P0007) no corresponde a la potencia del convertidor (P0206)</li> <li>➤ Cortocircuito en la alimentación del motor</li> <li>➤ Fallo a tierra</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comprobar si la potencia del motor se corresponde con la potencia del convertidor.</li> <li>2. Comprobar que no se ha superado los límites de longitud del cable.</li> <li>3. Comprobar el cable del motor y el motor para detectar cortocircuitos y defectos a tierra.</li> <li>4. Comprobar si los parámetros del motor variables con P0010=3 se corresponden con el motor utilizado.</li> <li>5. Comprobar la resistencia del estator (P0360).</li> <li>6. Incrementar el tiempo de aceleración (P1120).</li> <li>7. Reducir la elevación ajustada en (P1310), (P1311) y (P1312).</li> <li>8. Comprobar si el motor está obstruido o sobrecargado.</li> </ol>	Off II
<b>F0002</b> Sobretensión	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Tensión circuito intermedio (P0226) sobrepasa el nivel de fallo (P2172)</li> <li>➤ La sobretensión puede estar ocasionada bien por una tensión de alimentación demasiado alta o por un un funcionamiento regenerativo del motor.</li> <li>➤ El modo regenerativo puede ser ocasionado por rampas de aceleración rápidas o cuando el motor es arrastrado por una carga activa.</li> </ul>	<p>Revisar lo siguiente:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tensión alimentación (P0210) debe ajustarse dentro de los límites indicados en la placa de características.</li> <li>2. El regulador del circuito intermedio debe estar habilitado (P1240) y parametrizado adecuadamente.</li> <li>3. El tiempo de deceleración (P1121) debe ajustarse a la inercia de la carga.</li> <li>4. La potencia de frenado requerida debe ajustarse a los límites especificados.</li> </ol> <p>Nota Una inercia más alta necesita tiempos de rampa más largos; de otro modo, utilizar resistencias de frenado.</p>	Off II
<b>F0003</b> Subtensión	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fallo alimentación principal.</li> <li>➤ Carga brusca fuera de los límites especificados.</li> </ul>	<p>revisar lo siguiente:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tensión de alimentación (P0210) debe ajustarse dentro de los límites indicados en la placa de características.</li> <li>2. El suministro de tensión no debe ser susceptible a fallos temporales o reducciones de tensión.</li> </ol>	Off II
<b>F0004</b> Sobretemperatura convertidor	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ventilación insuficiente</li> <li>➤ Ventilador no operativo</li> <li>➤ Temperatura ambiente demasiado alta</li> </ul>	<p>Revisar lo siguiente:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El ventilador debe girar cuando el convertidor este funcionando</li> <li>2. La frecuencia de pulsación debe ajustarse al valor por defecto</li> <li>3. Temperatura ambiente podría ser superior a la especificada para el convertidor</li> <li>4. Comprobar que no están obstruidos los puntos de entrada y salida de aire.</li> </ol>	Off II

Error	Causa	Diagnóstico & Eliminar	Reac- ción
F0066 Convertidor I2T	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Convertidor sobrecargado.</li> <li>&gt; Ciclo de carga demasiado repetitivo.</li> <li>&gt; Potencia motor (P0307) sobrepasa la capacidad de potencia del convertidor (P0206).</li> </ul>	<p>Revisar lo siguiente:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ciclo de carga debe situarse dentro de los límites especificados.</li> <li>2. Potencia motor (P0307) debe ajustarse a la potencia del convertidor (P0206)</li> </ol>	Off II
F0011 Sobre- temperatura I2T del motor	Motor sobrecargado	<p>Revisar lo siguiente:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ciclo de carga debe ser corregido</li> <li>2. La constante tiempo térmica del motor (P0011) debe ser corregida</li> <li>3. Deje ajustarse el nivel de aviso de la temperatura del motor (P0004)</li> <li>4. Comprobar el parámetro de la constante de tiempo térmica del motor.</li> <li>5. Comprobar el parámetro de nivel de alarma del I<sup>2</sup>T del motor.</li> </ol>	Off II
F0041 Fallo en la identificación de datos del motor	Fallo en la medida de la resistencia del estator.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comprobar si el motor está conectado al convertidor.</li> <li>2. Comprobar si los datos del motor se han introducido correctamente.</li> </ol>	Off II
F0061 Fallo parámetro EEPROM	Fallo de lectura o escritura mientras guarda parámetros permanentes.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reajuste de fábrica y nueva parametrización.</li> <li>2. Sustituir el convertidor.</li> </ol>	Off II
F0062 Fallo pila de energía	Fallo de lectura para información de pila de energía o datos no válidos.	Sustituir el convertidor.	Off II
F0060 Timeout del ASIC	Fallo comunicaciones	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Si el fallo persiste, cambiar convertidor</li> <li>2. Contactar con el Servicio Técnico</li> </ol>	Off II
F0070 CB fallo consigna	No se recibe consigna de la tarjeta de comunicaciones durante el tiempo de telegrama off.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comprobar las conexiones de la tarjeta de comunicaciones.</li> <li>2. Comprobar el maestro.</li> </ol>	Off II
F0071 USS (enlace- BOP) fallo consigna	No hay respuesta durante el tiempo de telegrama off vía enlace BOP.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comprobar las conexiones de la tarjeta de comunicaciones.</li> <li>2. Comprobar el maestro.</li> </ol>	Off II
F0072 USS (enlace COMM) fallo consigna	No hay respuesta durante el tiempo de telegrama off enlace COMM.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comprobar las conexiones de la tarjeta de comunicaciones.</li> <li>2. Comprobar el maestro.</li> </ol>	Off II
F0060 pérdida señal de entrada ADC	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Rotura de hilo</li> <li>&gt; Señal fuera de límites</li> </ul>	Comprobar la conexión a la entrada analógica.	Off II
F0065 Fallo Externo	Fallo externo disparado a través	Bloquear la entrada disparo de fallo.	Off II
F0101 Desbordamiento de memoria	Error de software o fallo del procesador	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Activar rutinas de autotest.</li> <li>2. Sustituir el convertidor.</li> </ol>	Off II
F0221 Realimentación PID por debajo del valor mínimo. valor	Realimentación PID por debajo del valor mínimo P2268.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cambiar el valor de P2268.</li> <li>2. Ajustar la ganancia de la realimentación.</li> </ol>	Off II
F0222 PID Realimentación por encima del máximo. valor	Realimentación PID por encima del valor máximo P2267.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cambiar el valor de P2268.</li> <li>2. Ajustar la ganancia de la realimentación.</li> </ol>	Off II


Error	Causa	Diagnóstico & Eliminar	Reacción
<b>F0480</b> <b>Fallo en test</b> <b>BIST</b> (sólo para modo de servicio técnico)	<b>Valor de fallo:</b> 1 Ha fallado alguno de los tests de la sección de la etapa de potencia. 2 Ha fallado alguno de los tests de las placas de mando 4 Ha fallado alguno de los tests funcionales 8 Ha fallado alguno de los tests de E/S. (sólo MM 420) 16 La RAM interna ha fallado en su verificación al ponerla en marcha	1. El convertidor puede ponerse en marcha pero determinadas acciones pueden no funcionar. 2. Sustituir el convertidor.	<b>Off II</b>

Para poner a cero el código de error es posible utilizar uno de los tres métodos que se indican a continuación:

1. Adaptar la potencia al dispositivo.
2. Pulsar el botón  situado en el BOP.
3. Mediante impulso digital 3( configuración por defecto)

Error	Causa	Diagnosia & Eliminar	Reac- ción
<b>P0460</b> <b>Fallo en test</b> <b>BIST</b> <b>(sólo para modo</b> <b>de servicio</b> <b>técnico)</b>	<b>Valor de fallo:</b> <b>1</b> Ha fallado alguno de los tests de la sección de la etapa de potencia. <b>2</b> Ha fallado alguno de los tests de las placas de mando <b>4</b> Ha fallado alguno de los tests funcionales <b>8</b> Ha fallado alguno de los tests de E/S. (sólo MM 420) <b>16</b> La RAM interna ha fallado en su verificación al ponerla en marcha	<b>1.</b> El convertidor puede ponerse en marcha pero determinadas acciones pueden no funcionar. <b>2.</b> Sustituir el convertidor.	<b>Off</b>

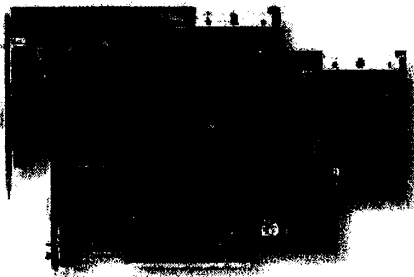
Para poner a cero el código de error es posible utilizar uno de los tres métodos que se indican a continuación:

1. Adaptar la potencia al dispositivo.
2. Pulsar el botón  situado en el BOP.
3. Mediante impulso digital 3( configuración por defecto)

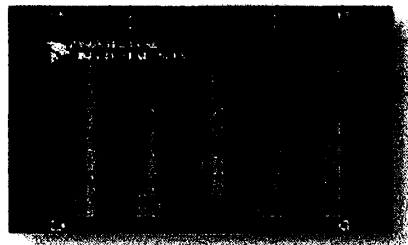
## **ANEXO 3**

### **TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS 6024E**

En el proyecto para la adquisición de datos se utilizó una tarjeta de adquisición de datos de National Instrument la PCI 6024E y el bloque de adquisición de 68 pines para las tarjetas de la serie E de NI modelo CB-68LP.



**PCI-6024E**



**Bloque conector**

Entre las características básicas de la tarjeta PCI-6024E mencionamos las siguientes:

- 2 Salidas analógicas
- 16 entradas analógicas con una resolución de 12 bits cada una
- 8 líneas digitales de I/O
- 2 contadores de 24 bits

Otras características y especificaciones de la tarjeta se aprecian en los siguientes cuadros.

Family	Bus	Addressing	Input	Resolution	Max. Sampling Rate	Input Range	Output Range	Resolution	Output Range	Resolution	Input Range
M 8000E	PCI, PCI/MCA	16 SE/0 DI	16 bits	20 MS/s	±10V to ±10V	2	16 bits	10 kV	10 kV	±10V	1
M 8000E	PCI, PCI/MCA	16 SE/0 DI	16 bits	20 MS/s	±10V to ±10V	0	-	10 kV	10 kV	±10V	1
M 8000E	PCI, PCI/MCA	16 SE/0 DI	12 bits	20 MS/s	±10V to ±10V	2	12 bits	10 kV	10 kV	±10V	1
M 8000E	PCI, PCI/MCA	16 SE/0 DI	12 bits	20 MS/s	±10V to ±10V	2	12 bits	10 kV	10 kV	±10V	1
M 8000E	PCI	16 SE/0 DI	12 bits	20 MS/s	±10V to ±10V	0	-	10 kV	10 kV	±10V	1
M 8000E	PCI	16 SE/0 DI	12 bits	20 MS/s	±10V to ±10V	0	-	10 kV	10 kV	±10V	1
M 8000E	PCI, PCI/MCA	16 SE/0 DI	12 bits	20 MS/s	±10V to ±10V	2	12 bits	10 kV	10 kV	±10V	1
M 8000E	PCI, PCI/MCA	16 SE/0 DI	12 bits	20 MS/s	±10V to ±10V	2	12 bits	10 kV	10 kV	±10V	1
M 8000E	PCI, PCI/MCA	16 SE/0 DI	12 bits	20 MS/s	±10V to ±10V	2	12 bits	10 kV	10 kV	±10V	1

Table 1. M Low-Cost E-Series Analog Cards

1. 12 bits typical when using the single channel channel for analog output. 12.5 conversions when using the single channel channel for analog output. 12.5 conversions when using the single channel channel for analog output. 12.5 conversions when using the single channel channel for analog output.

Models	Measurement Bandwidth (MHz)	M 8000E, M 8000E	M 8005	M 8005	M 8005	M 8005	M 8005	M 8005	M 8005	M 8005	M 8005	M 8005	M 8005	M 8005
10	-10	1.47	1.47	4.74	14.20	43.92	129.9	389.8	1179.7	3539.2	10717.8	32153.4	96460.2	
5	-5	2.07	6.20	18.60	55.80	167.40	502.20	1506.60	4519.80	13559.40	40678.20	122034.60	366103.80	
2	-2	0.20	0.60	1.80	5.40	16.20	48.60	145.80	437.40	1312.20	3936.60	11809.80	35429.40	
1	-1	0.22	0.66	1.98	5.94	17.82	53.46	160.38	481.14	1443.42	4330.26	13090.78	39272.34	
0.5	-0.5	0.215	0.645	1.935	5.805	17.415	51.245	153.735	451.205	1353.615	40608.45	121825.35	365476.05	
0.25	-0.25	0.107	0.321	0.963	2.901	8.703	25.608	76.824	228.471	685.422	2056.266	61687.983	185063.025	
0.2	-0.2	0.102	0.306	0.918	2.754	8.262	24.786	74.358	223.074	669.222	20176.662	60529.986	181589.958	
0.1	-0.1	0.061	0.183	0.549	1.647	4.941	14.823	44.469	133.407	400.221	1200.663	3601.989	10805.967	
0.05	-0.05	0.0305	0.0915	0.2745	0.8235	2.4705	7.4115	22.2345	66.7035	200.1105	600.3315	1800.9945	5402.9835	
1	0	0.008	0.024	0.072	0.216	0.648	1.944	5.832	17.496	52.488	157.464	472.392	1417.176	
2	0	0.016	0.048	0.144	0.432	1.296	3.888	11.672	34.992	104.976	314.928	944.784	2834.352	
5	0	0.040	0.120	0.360	1.080	3.240	9.720	29.160	87.480	262.440	787.320	2361.960	7085.880	
10	0	0.080	0.240	0.720	2.160	6.480	19.440	58.320	174.960	524.880	1574.640	4723.680	14171.760	
0.2	0	0.008	0.024	0.072	0.216	0.648	1.944	5.832	17.496	52.488	157.464	472.392	1417.176	
0.1	0	0.004	0.012	0.036	0.108	0.324	0.972	2.916	8.748	26.244	78.744	236.196	708.588	
0.05	0	0.002	0.006	0.018	0.054	0.162	0.486	1.458	4.374	13.122	39.372	118.098	354.294	
0.02	0	0.0008	0.0024	0.0072	0.0216	0.0648	0.1944	0.5832	1.7496	5.2488	15.7464	47.2392	141.7176	
0.01	0	0.0004	0.0012	0.0036	0.0108	0.0324	0.0972	0.2916	0.8748	2.6244	7.8744	23.6196	70.8588	

Table 2. Low-Cost E-Series Analog Input Absolute Accuracy Specifications

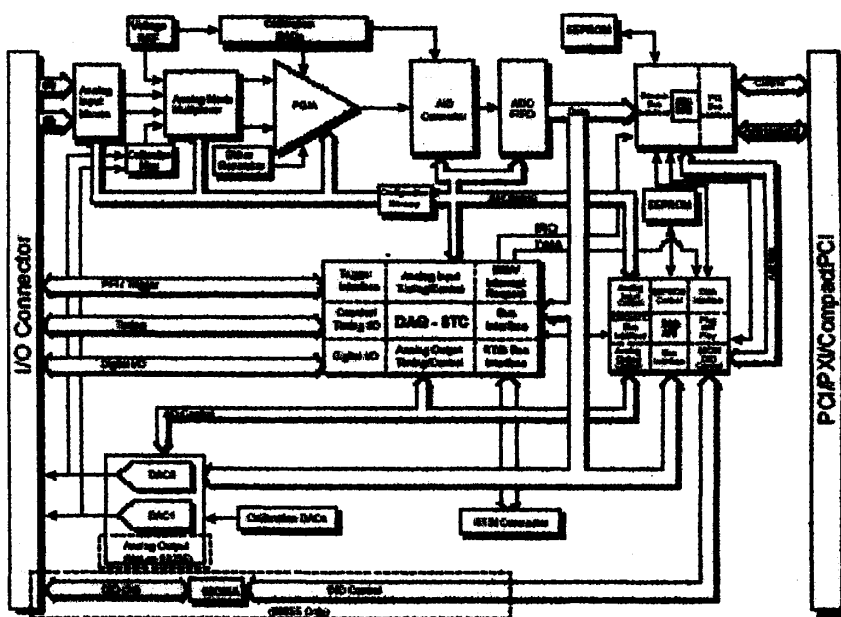
Note: Accuracy is given for measurements taken on a known calibration. Measurement accuracy is listed for specified temperatures within ±1°C of nominal calibration temperature and ±10°C interval in factory-calibration temperature. One-year calibration interval is recommended. The Absolute Accuracy at full scale conditions were provided for a mid-range input voltage for example, 10V for the ±10V range after one year, assuming 100 ppm/°C drift in the input signal at the mid-range input range.

		PCI-6024E Models				Low-Cost Models		Other
Model		NI 6024E, NI 6027E, NI 6026E, NI 6029E	NI 6026E	NI 6070E, NI 6071E	NI 6026E	PCI-6026E	PCI-6026E, NI 6026E	NI 6073, NI 6084
Resolution (bits)		Absolute Accuracy (%)						
Position #1	Significant #1							
10	-10	1.43	1.43	0.127	0.127	2.617	0.127	3.035
10	0	1.281	1.176	5.835	5.835	-	-	-

Table 3. Low-Cost E Series Analog Output Absolute Accuracy Specifications

La comunicación de la tarjeta con el Matlab es a través de Simulink y xPCtarget, Simulink en sus librerías posee una gama de modelos de tarjetas de adquisición de datos entre las cuales se encuentra la PCI-6024E.

En la siguiente figura se puede ver al diagrama de bloques de la tarjeta de adquisición 6024E



La ubicación y la descripción de cada uno de los pines de la tarjeta y el bloque de adquisición, se muestra en la figura abajo.

ACH6	34	36	ACH10
ACH11	33	37	AGND
AGND	32	38	ACH6
ACH10	31	39	ACH2
ACH3	30	40	AGND
AGND	29	41	ACH11
ACH4	28	42	AISENSE
AGND	27	43	ACH12
ACH13	26	44	ACH5
ACH5	25	45	AGND
AGND	24	46	ACH14
ACH15	23	47	ACH7
DAC0OUT*	22	48	AGND
DAC1OUT*	21	49	AGND*
RESERVED	20	50	AGND*
DIO4	19	51	DGND
DGND	18	52	DIO0
DIO1	17	53	DIO5
DIO6	16	54	DGND
DGND	15	55	DIO2
5 V	14	56	DIO7
DGND	13	57	DIO3
DGND	12	58	SCANCLK
PFI0/TRIG1	11	59	EXTSTROBE*
PFI1/TRIG2	10	60	DGND
DGND	9	61	PFI2/CONVERT*
5 V	8	62	PFI3/GPCTR1_SOURCE
DGND	7	63	PFI4/GPCTR1_GATE
PFI6/UPDATE*	6	64	GPCTR1_OUT
PFI6/WFTRIG	5	65	DGND
DGND	4	66	PFI7/STARTSCAN
PFI6/GPCTR0_GATE	3	67	PFI8/GPCTR0_SOURCE
GPCTR0_OUT	2	68	DGND
FREQ_OUT	1	69	DGND

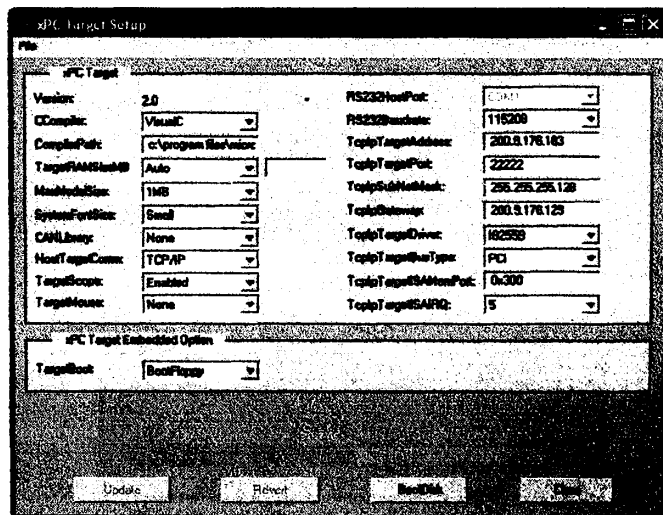


## ANEXO 4

### COMUNICACIÓN HOST - TARGET

La comunicación entre las computadoras Host y Target se lo realizo por medio de protocolo TCP/IP, para lo cual la PC Target debe tener instalada una tarjeta de red para trabajar a altas velocidades, y en el PC Host debe instalarse el Matlab con todas sus herramientas.

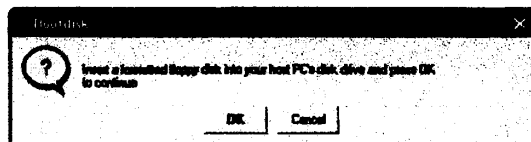
Estas son parte de las condiciones físicas que deben tener las computadoras que trabajaran como Target y como Host, además de un BootDisk que se lo realiza en el Host y se lo inserta en el Target, con la finalidad de cargar el programa Kernel al encender la Target.



Para hacer un BootDisk, hay que es ingresar en la ventana de comandos de Matlab el comando *xpcsetup* y presionar *enter*, esto abrirá la ventana de parámetros del xPCtarget, que se revisó en la figura anterior.

Cabe recalcar que en la ventana que aparece al ejecutar *xpcsetup* hay que configurar la red de trabajo de los dos computadores Host y Target, para que la comunicación pueda llevarse a cabo entre ellos, luego se presiona update.

Una vez que se cargan todos los parámetros de configuración, se inserta un disquete en la Host y se presiona BootDisk, luego de lo cual aparece el siguiente cuadro de diálogo:

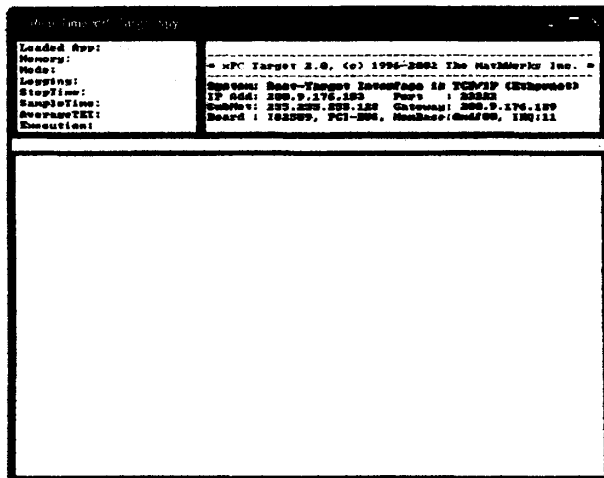


Una ves que se presiona Ok, aparece la siguiente pantalla que muestra el avance de la elaboración del BootDisk:



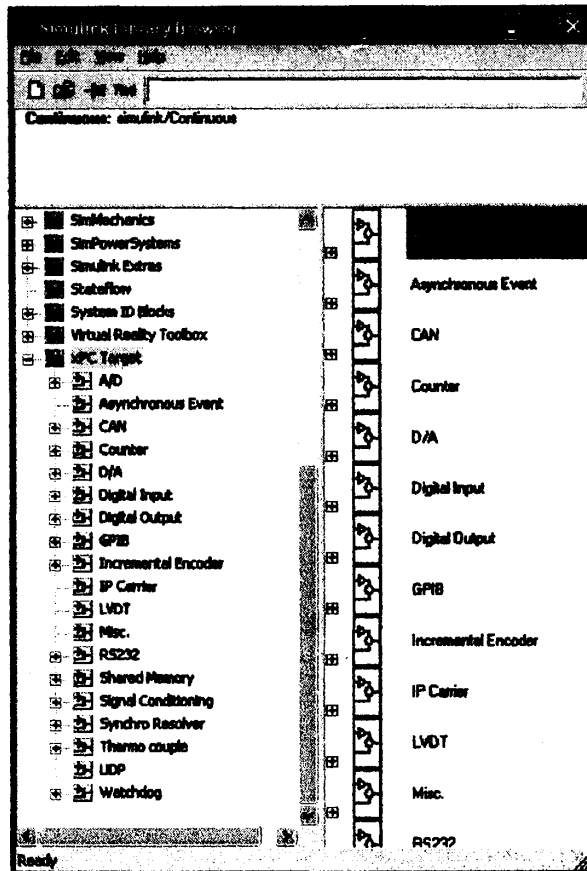
Al finalizar la construcción del disquete de arranque, queda listo para trabajar en la adquisición de datos para el control de la planta o proyecto que se desea controlar.

Al encender la maquina Target con el BootDisk insertado el monitor presentara la siguiente pantalla de inicio, donde muestra las direcciones IP y el estado de la ejecución de la aplicación.



```
-----
xPC Target 2.0. (c) 1996-2002 The MathWorks, Inc.
-----
Loaded App:
Hexes:
Mode:
LogPath:
SampleTime:
Board:
Execution:
-----
System: Real-Time Inteface to TCP/IP (Embedded)
IP Add: 200.9.176.100  Port : 22222
Gateway: 200.9.176.100  Gateway: 200.9.176.100
Board : ICR200, PCI-200.  MemBase:0x0100, 1Mx111
```

Las señales que son enviadas al computador desde la planta y viceversa, son transmitidas mediante bloques de salida y entrada analógicos, estos representan a la tarjeta de adquisición de datos en la programación construida en Simulink, y se las seleccionan en la librería xPCTarget, que se muestra en la siguiente figura.



Para finalizar la comunicación de la planta o proceso con los computadores, se debe enviar a construir la codificación de la aplicación que se a creado en Simulink, es decir, descargar la aplicación o programación de bloques desarrollada en Simulink en el computador Target.

## **ANEXO 5**

### **CONTROL PID CLÁSICO**

#### **Panorama:**

**Estructura PID**

**Ajuste empírico**

**Método de oscilación de Ziegler-Nichols**

**Métodos basados en la respuesta al escalón (curva de reacción)**

#### **Introducción**

examinaremos una particular estructura de control que es casi universalmente utilizada en la industria. Se trata de la familia de controladores de estructura fija llamada **familia de controladores PID**.

Estos controladores han mostrado ser robustos y extremadamente beneficiosos en el control de muchas aplicaciones de importancia en la industria. PID significa

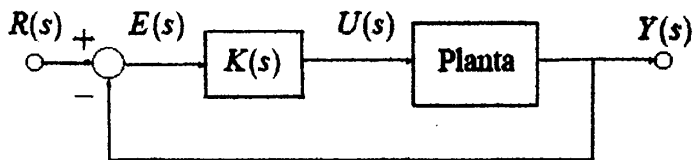
**Proporcional,**

**Integral**

**Derivativo.**

Hoy en día, a pesar de la abundancia de sofisticadas herramientas y métodos avanzados de control, el controlador PID es aún el más ampliamente utilizado en la industria moderna, controlando más del 95% de los procesos industriales en lazo cerrado.

Consideramos el lazo básico de control SISO



Las formas estándar de controladores PID:

Proporcional  $K_p(s) = K_p$

Proporcional e Integral  $K_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

Proporcional y Derivativo  $K_{PD} = K_p \left( 1 + \frac{T_d s}{\tau_d s + 1} \right)$

Proporcional, Integral y Derivativo  $K_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_d s}{\tau_d s + 1} \right)$

Alternativamente, tenemos la forma serie

$$K_{\text{serie}}(s) = K_s \left( 1 + \frac{I_s}{s} \right) \left( 1 + \frac{D_s s}{\gamma_s D_s s + 1} \right),$$

y la forma paralelo

$$K_{\text{paralelo}}(s) = K_p + \frac{I_p}{s} + \frac{D_p s}{\gamma_p D_p s + 1}$$

### **Ajuste empírico de controladores PID**

Debido a su difundido uso en la práctica, presentamos a continuación varios métodos de ajuste empírico de controladores PID, basados en mediciones realizadas sobre la planta real.

Estos métodos, referidos como clásicos, comenzaron a usarse alrededor de 1950. Hoy en día, es preferible para el diseñador de un PID usar técnicas basadas en modelo.

- El método de oscilación de Ziegler-Nichols
- El método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols
- El método de la curva de reacción de Cohen-Coon

### **Método de oscilación de Ziegler-Nichols**

Este método es válido sólo para plantas estables a lazo abierto. El procedimiento es el siguiente:

1. Aplicar a la planta sólo control proporcional con ganancia  $K_p$  pequeña.
2. Aumentar el valor de  $K_p$  hasta que el lazo comience a oscilar. La oscilación debe ser lineal y debe detectarse en la salida del controlador  $u(t)$ .
3. Registrar la ganancia crítica  $K_p = K_c$  y el período de oscilación  $P_c$  de  $u(t)$ , a la salida del controlador.
4. Ajustar los parámetros del controlador PID de acuerdo al Cuadro 1.

	$K_p$	$T_r$	$T_d$
P	$0,50K_c$		
PI	$0,45K_c$	$\frac{P_c}{1,2}$	
PID	$0,60K_c$	$\frac{P_c}{2}$	$\frac{P_c}{8}$

Cuadro 1: Parámetros de controladores PID según el método de oscilación de Ziegler-Nichols.

Es importante saber cuál es la estructura (estándar, serie o paralelo) del PID al que se aplica el ajuste propuesto por Ziegler y Nichols. Existe cierta controversia respecto a cuál fue la estructura originalmente usada por Ziegler y Nichols; las reglas dadas aquí se proponen para la estructura estándar.



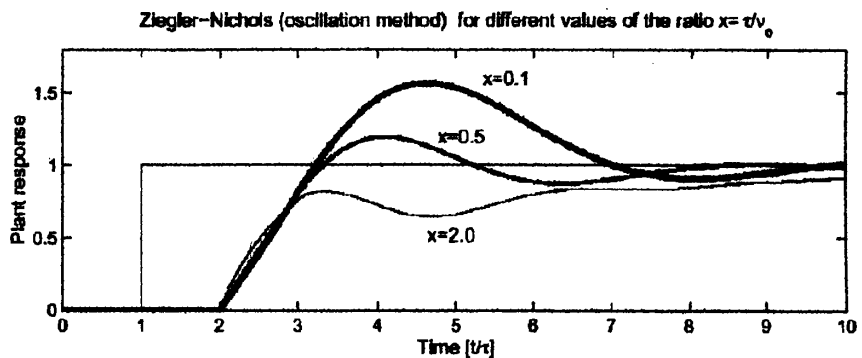
## Desempeño con el método de oscilación de Z-N

Notar que el modelo intrínsecamente obtenido en el experimento es sólo un punto de la respuesta en frecuencia, que corresponde a fase  $-180^\circ$  y magnitud  $Kc^{-1}$ , dado que el diagrama de Nyquist cruza el punto  $(-1;0)$  cuando  $Kp = Kc$ .

Para analizar el efecto del ajuste de control proporcionado por el método de oscilación de Ziegler-Nichols consideremos una planta general con función transferencial.

$$G_0(s) = \frac{k_0 e^{-s\tau_0}}{\gamma_0 s + 1}; \quad \gamma_0 > 0$$

La Figura muestra la respuesta del lazo cerrado con un controlador PID ajustado mediante el método de oscilación de Ziegler-Nichols para distintos valores de  $x = t_0/\gamma_0$ . El eje de tiempos se representa normalizado en unidades de  $t=t_0$



**Figura 1: Respuesta a lazo cerrado de la planta (3) con PID ajustado mediante el método de oscilación de Ziegler-Nichols.**

Vemos que el ajuste es muy sensible al cociente  $t_0 = \gamma_0$ . Otra limitación es que se requiere forzar en la planta una oscilación que puede ser peligrosa o inconveniente en muchos casos.

### **Método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols**

Muchas plantas en la práctica pueden describirse satisfactoriamente con un modelo de la forma (3). Una versión linealizada quantitativa de este modelo puede obtenerse mediante un experimento a lazo abierto con el siguiente procedimiento:

1. Llevar manualmente la planta a lazo abierto a un punto de operación normal manipulando  $u(t)$ . Supongamos que la planta se estabiliza en  $y(t) = y_0$  para  $u(t) = u_0$ .
2. En un instante inicial  $t_0$  aplicar un cambio escalón en la entrada, de  $u_0$  a  $u_\infty$  (el salto debe estar entre un 10 a 20% del valor nominal).
3. Registrar la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. La Figura 2 muestra una curva típica.
4. Calcular los parámetros del modelo (3) de las fórmula

$$k_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}, \quad \tau_0 = t_1 - t_0, \quad \gamma_0 = t_2 - t_1.$$

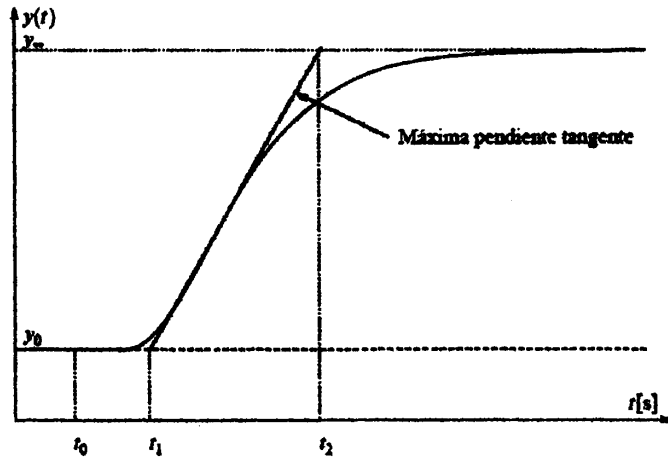


Figura 2: Respuesta al escalón (curva de reacción) en lazo abierto de la planta.

Los parámetros del controlador PID propuestos por Ziegler y Nichols a partir de la curva de reacción se determinan del Cuadro 2.

	$K_p$	$T_r$	$T_d$
P	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0}$		
PI	$\frac{0,9\gamma_0}{K_0 \tau_0}$	$3\tau_0$	
PID	$\frac{1,2\gamma_0}{K_0 \tau_0}$	$2\tau_0$	$0,5\tau_0$

Cuadro 2: Parámetros de controladores PID según el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols.

## Desempeño con el método de la CR de Z-N

Consideramos nuevamente la planta genérica (3) para analizar el desempeño obtenido con el ajuste de Ziegler-Nichols a partir de la curva de reacción.

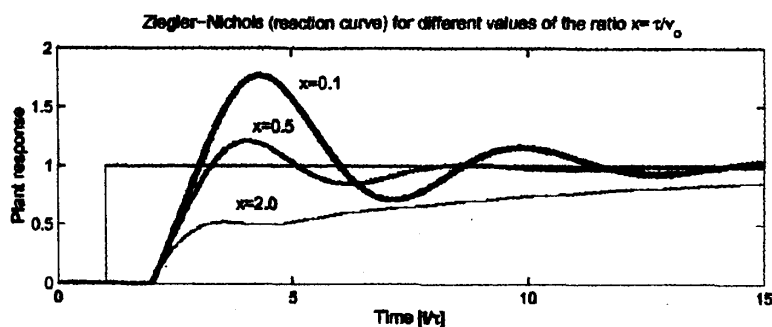


Figura 3: Respuesta a lazo cerrado de la planta (3) con PID ajustado de la curva de reacción vía Ziegler-Nichols.

## Método de la curva de reacción de Cohen-Coon

La Figura 3 muestra que el ajuste de Ziegler y Nichols para la curva de reacción es muy sensible a variaciones de  $t=g_0$ . Cohen y Coon desarrollaron una tabla modificada para mejorar esta limitación usando datos del mismo ensayo.

	$K_p$	$T_r$	$T_d$
P	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(1 + \frac{\tau_0}{3\gamma_0}\right)$		
PI	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(0,9 + \frac{\tau_0}{12\gamma_0}\right)$	$\frac{\tau_0(30\gamma_0 + 3\tau_0)}{9\gamma_0 + 20\tau_0}$	
PID	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(\frac{4}{3} + \frac{\tau_0}{4\gamma_0}\right)$	$\frac{\tau_0(32\gamma_0 + 6\tau_0)}{13\gamma_0 + 8\tau_0}$	$\frac{4\tau_0\gamma_0}{11\gamma_0 + 2\tau_0}$

Cuadro 3: Parámetros de controladores PID según el método de la curva de reacción de Cohen-Coon.

### Desempeño con el método de la CR de C-C

La Figura 4 muestra la respuesta de lazo cerrado con el ajuste Cohen-Coon. Aunque aún es sensible a  $x = t/\tau_0$ , la respuesta es mucho más homogénea que con el ajuste Ziegler-Nichols.

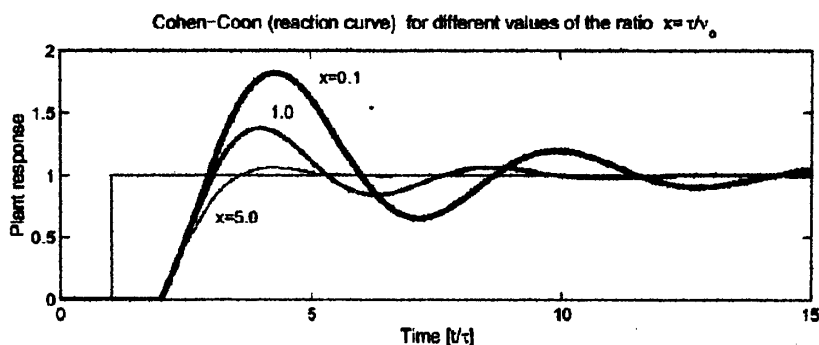


Figura 4: Respuesta a lazo cerrado de la planta (3) con PID ajustado de la curva de reacción vía Cohen-Coon.

# BIBLIOGRAFIA

[http://www.chemkeys.com/esplagluyc\\_3/sidu\\_2/vds\\_2.htm](http://www.chemkeys.com/esplagluyc_3/sidu_2/vds_2.htm)

<http://prof.usb.ve/jaller/Ascenso/capitulo4.pdf>

<http://www.elo.utp fsm.cl/elo383/apuntes/controlvectorial.pdf>

<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/xpc/xpc.html>

<http://www1.universia.net/CatalogaXXI/C10010PPESII1/E39897>

Modern Control Systems; Richard C. Dorf & Robert H. Bishop

Simulink user guide; The MathWorks

Power System Blockset for use with Simulink; The MathWorks

The Real-Time Workshop for use with Simulink; The MathWorks

Xpc Target for use with Real-Time Workshop; The MathWorks

System Identifications user guide; The MathWorks

Tesis de Graduación "Implementación de un Control Digital para el Módulo de Control y Caudal de la Planta de control de Procesos de la FIMCP"; Ing. Jaime H. Ríos Orellana.