



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL
DE FRECUENCIA Y VOLTAJE UTILIZANDO MATLAB**

TRABAJO DE GRADUCIÓN

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERA EN ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN
ELECTRÓNICA INDUSTRIAL**

Presentada por:

**MARIA ANTONIETA ALVAREZ VILLANUEVA
JOSE LUIS GONZALEZ RUGEL**

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2005

AGRADECIMIENTO

A los ingenieros JUAN DEL POZO Y SARA RIOS, Directores del Tópico, por su colaboración en la realización del mismo. A nuestras familias, por su apoyo incondicional.

DEDICATORIA

A Dios

A mis padres y hermanos

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Miguel Yapur Auad
SUBDECANO DE LA FIEC
PRESIDENTE

Ing. Juan Del Pozo L.
DIRECTOR DE TOPICO

Ing. Efrén Herrera M.
VOCAL PRINCIPAL

Ing. Hugo Villavicencio
VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de grado, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL“

José Luis González Rugel

María Antonieta Alvarez Villanueva

RESUMEN

El presente trabajo describe el desarrollo de un sistema de control automático basado en la generación de corriente eléctrica, controlando dos parámetros que son voltaje y frecuencia de la carga final por medio de dos variables control que son: voltaje de campo del alternador y la velocidad del motor.

Para poder realizar el sistema se tuvo que investigar todo sobre cada uno de los equipos que intervendrían en la generación de corriente eléctrica, identificando sus variables de control y características. Toda la información teórica de los equipos se encuentra dentro del Anexo A explicando explícitamente su comportamiento y características de trabajo.

El anexo B nos permite conocer más sobre nuestros programas MatLab y Simulink que son la plataforma de control del sistema. Los anexos (C – D – E) son representaciones gráficas del proyecto realizado en los cuales podemos identificar los circuitos eléctricos, electrónicos y de fuerza diseñados. El anexo F contiene la documentación fotográfica de la estructura del sistema identificando cada parte y su funcionamiento. En el anexo G encontramos los formularios de las prácticas de laboratorio para que los usuarios puedan obtener las indicaciones de trabajo; por último en el anexo H se a documentado

todas las tablas de datos obtenidas en las diferentes pruebas, al igual que la documentación de las conexiones de la tarjeta.

Como lo indicamos anteriormente, para poder controlar un equipo debemos conocer su funcionamiento y una representación matemática que nos permite conocer como funciona un equipo es su función de transferencia, la cuál relaciona la variable de salida del equipo con la variable de entrada del mismo. En el primer capítulo se realizó un estudio de cada equipo obteniendo su función de transferencia matemática. Esta información obtenida de forma individual por equipos, que intervienen dentro del sistema es unificado por medio de dos herramientas de informática, programas basados en plataformas Windows que son: MatLab y Simulink, obteniendo así una representación matemática teórica, que nos permitió observar las relaciones entre las variables de control y las controladas.

En el capítulo dos nos ayudó a modelar un motor AC, ya que de forma matemática presenta una gran complejidad. Simulink nos permite realizar modelos de procesos reales por medio de diagramas de bloques gráficos, bajo una programación orientadas a objetos donde cada bloque tiene sus propias características y propiedades que unificadas simulan un proceso real. Es en

estos software donde se utilizaron los datos obtenidos de las funciones de transferencia del capítulo uno simulando el sistema y observando sus comportamiento bajo condiciones de perturbaciones que pueden existir. El capítulo dos por lo tanto nos presentará el comportamiento teórico frente a perturbaciones del proceso que vamos a controlar con el motor adecuado y comparando este con las relaciones ya obtenidas del capítulo uno.

El capítulo tres explica cuales son los equipos reales que vamos a utilizar en la implementación de la sistema, obteniendo de cada uno sus datos de placa y curvas de trabajo reales; por medio de las curvas de trabajo se obtiene el valor de relación entre una variable y otra. Estos valores obtenidos por medio de equipos de medición en lazo abierto, son ingresados por medio de la tarjeta de comunicación de marca National Instrument, XPC Target, quién se comunica por medio de Simulink ingresando y sacando señales del computador que permite el control del proceso real en lazo cerrado.

Antes del proceso de lazo cerrado se debió primero obtener el desacoplador de variables (sección 3.2) ya que nuestro sistema es un sistema con características de lazo cruzado. Una vez obtenido e instalado el desacoplador en el sistema procedemos a obtener el controlador indicado que nos permitirá

mantener el sistema estable con la mayor exactitud y velocidad posible. Este controlador es explicado en la sección 3.4 por medio de un mecanismo analítico y empírico.

En el capítulo cuatro ponemos a prueba nuestro sistema, verificando su comportamiento y control frente a cambios de niveles de seteo y de valores de carga; identificando así sus valores límites de trabajo y su característica en sistemas reales.

Para finalizar en el capítulo cinco se crearon las prácticas de laboratorio que se podrán realizar con el modelo físico de generación, cada práctica tiene su objetivo de enseñanza y el afán de aumentar la habilidad y destreza de los estudiantes frente a procesos de control automático. La práctica uno es una introducción a los sistemas de MatLab y SIMULINK, trabajando con sistemas teóricos. La práctica dos y tres hablan del sistema de lazo cruzado, la característica intrínseca de nuestro modelo y de cómo obtener el controlador apropiado de forma analítica y empírica.

INDICE GENERAL

	Pág
RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL.....	VI
INDICE DE FIGURAS.....	XVI
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 1.....	3
1 SISTEMA A CONTROLAR.....	3
1.1 Modelo del diagrama de bloques en función del tiempo.....	6
1.2 Modelo del diagrama de bloques en función de la frecuencia.....	8
1.3 Descripción de los bloques.....	9
1.3.1 Motor.....	9
1.3.2 Generador.....	11
1.3.3 Controlador de velocidad del motor.....	13
1.3.4 Control de voltaje de campo del generador.....	14
1.3.5 Tacómetro.....	15
1.3.6 Carga.....	15
1.3.7 Perturbación interna del motor.....	16
1.3.8 Perturbación interna del generador.....	16
1.4 Funciones de transferencia.....	17

1.4.1	Funciones de transferencia teórica a lazo abierto – (Voltaje de campo constante).....	17
1.4.2	Funciones de transferencia teórica a lazo abierto – (Velocidad constante).....	19
1.5	Sistema teórico en Simulink.....	22
1.5.1	Voltaje Generado variando Velocidad.....	23
1.5.2	Frecuencia Generada variando Velocidad.....	25
1.5.3	Voltaje Generado variando Voltaje de Campo.....	27
1.5.4	Frecuencia Generada variando Voltaje de Campo.....	30
1.5.5	Voltaje Generado variando Perturbación (IL).....	31
1.5.6	Frecuencia Generada variando Perturbación (IL).....	34
CAPITULO 2.....		38
2	SIMULACION DEL SISTEMA USANDO SIMULINK.....	38
2.1	Sistema a controlar.....	38
2.1.1	Simulación del sistema manteniendo constante el voltaje de campo (v_f) y variando el voltaje de control del variador (V_c).....	38
2.1.2	Simulación del sistema manteniendo constante el voltaje de control del variador (V_c) y variando	

el voltaje de campo (V_f).....	41
2.1.3 Simulación del sistema manteniendo constante el voltaje de control del variador (V_c), el voltaje de campo (V_f) y variando la corriente de carga.....	43
CAPITULO 3.....	46
3 PRUEBA DE CAMPO.....	46
3.1 Prueba de Equipos, adquisición de datos y curvas características.....	46
3.1.1 Motor.....	46
3.1.1.1 Curvas de trabajo.....	48
3.1.1.1.1 Frecuencia vs RPM del motor.....	48
3.1.1.1.2 I armadura vs RPM.....	49
3.1.2 Alternador.....	50
3.1.2.1 Curvas de trabajo.....	51
3.1.2.1.1 RPM del motor vs RPM del alternador.....	51
3.1.2.1.2 Voltaje Generado vs RPM del Generador (voltaje de campo constante a 15 VDC).....	52
3.1.2.1.3 Voltaje Generado vs Voltaje de Campo (RPM del Generador constante	

1819 RPM).....	53
3.1.2.1.4 Frecuencia Generada vs RPM del Generado.....	55
3.1.2.1.5I generado vs RPM del Generado.....	56
3.1.3 Tacómetro.....	57
3.1.3.1 Curvas de trabajo.....	58
3.1.3.1.1RPM del motor vs RPM del tacómetro.....	58
3.1.3.1.2Voltaje Generado vs RPM del tacómetro (voltaje de campo constante).....	59
3.1.4 Variador de frecuencia.....	60
3.1.4.1 Curvas de trabajo.....	62
3.1.4.1.1 Voltaje de Control vs Frecuencia de salida.....	62
3.1.5 Carga (Focos).....	63
3.1.5.1 Curvas de trabajo.....	64
3.1.5.1.1 Curva de Corriente vs Voltaje.....	64
3.1.6 Sistema de control.....	66
3.1.6.1 Curva de trabajo.....	67
3.1.6.1.1 Salida de control del variador de frecuencia vs Voltaje de control del variador	

	de frecuencia.....	67
3.1.6.1.2	Salida de control del voltaje de campo vs voltaje de campo del generador.....	68
3.1.6.1.3	Voltaje de I tacómetro vs entrada de voltaje del tacómetro al computador.....	70
3.1.6.1.4	Voltaje generado en el generador vs entrada de voltaje generado al computador.....	71
3.1.6.1.5	Voltaje generado en le generador vs Variable de control de voltaje.....	72
3.1.6.1.6	Frecuencia generada en el generador vs Variable de control de frecuencia.....	74
3.2	Adquisición de datos utilizando XPCTarget	77
3.2.1	Configuración de xPC Target.....	81
3.2.2	Curvas del sistema.....	84
3.2.2.1	Gráficas del sistema manteniendo constante el voltaje de campo (V_f) y variando el voltaje de control del variador (V_c).....	86
3.2.2.2	Gráficos del sistema manteniendo constante el voltaje de control del variador (V_c) y variando	

	el voltaje de campo (V_f).....	89
3.2.2.3	Gráficas del sistema manteniendo constante el voltaje de control del variador de frecuencia (v_c), el voltaje de campo (V_f) y variando la carga.....	91
3.3	Función de transferencia del sistema	93
3.3.1	Cálculo de la matriz de descoplamiento.....	93
3.3.2	Determinación de las funciones de transferencia del sistema...99	
3.3.2.1	Función de transferencia del sistema F_g/V_c manteniendo constante el voltaje de campo (V_f).....	101
3.3.2.2	Función de transferencia del sistema V_g/V_f manteniendo constante el voltaje del variador (V_c)....	112
3.4	Controladores de la planta.....	118
3.4.1	Diseño de controladores de forma analítica.....	120
3.4.1.1	Diseño del controlador del sistema F_g/V_c	120
3.4.1.2	Diseño del controlador del sistema V_g/V_f	124
3.4.2	Diseño de controladores de forma empírica.....	129
3.4.2.1	Controlador del sistema F_g/V_c	129
3.4.2.2	Controlador del sistema V_g/V_f	131
3.4.3	Operación del sistema.....	134

CAPITULO 4.....	150
4 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA FRENTE A CAMBIO DE SETEO Y CARGA.....	150
4.1 Comportamiento del sistema frente a variaciones del seteo de voltaje.....	150
4.2 Sobrecarga del sistema.....	155
CAPITULO 5.....	159
5 MANUAL DE EXPERIMENTACION.....	159
5.1 Práctica 1: Análisis de estabilidad teórica.....	159
5.1.1 Objetivo.....	159
5.1.2 Introducción y teoría.....	160
5.1.3 Pre-práctica.....	162
5.1.4 Práctica.....	172
5.1.4.1 Materiales.....	172
5.1.4.2 Parámetros de equipos a utilizar.....	172
5.1.4.3 Pasos de instalación del sistema.....	174
5.1.4.3.1 Voltaje Generado variando Velocidad.....	176
5.1.4.3.2 Frecuencia Generada variando Velocidad..	178
5.1.4.3.3 Voltaje Generado variando Voltaje	

	de Campo.....	180
5.1.4.3.4	Frecuencia Generada variando Voltaje de Campo.....	182
5.1.4.3.5	Voltaje Generado variando Perturbación (IL).....	184
5.1.4.3.6	Frecuencia Generada variando Perturbación (IL).....	186
5.1.4.4	Daros a obtener.....	189
5.1.5	Conclusiones y Recomendaciones.....	190
5.2	Práctica 2: Descopladores del sistema	191
5.2.1	Objetivo.....	191
5.2.2	Teoría, Control de Procesos Multivariables.....	191
5.2.2.1	Selección de variables controladas y manipuladas...	192
5.2.2.2	Ganancias lazo abierto	193
5.2.2.3	Método de Bristol, Matriz de Ganancia Relativa (MGR).....	196
5.2.2.4	Regla para aparear las variables controladas y manipuladas.....	197
5.2.3	Práctica.....	199
5.2.4	Conclusiones y Recomendaciones.....	206

5.3 Práctica 3: Obtención del Controlador para un sistema

Multivariable.....206

5.3.1 Objetivo.....206

5.3.2 Práctica.....207

5.3.2.1 Cálculo del controlador de forma empírica.....207

5.3.2.2 Cálculo del controlador con la herramienta SISO.....214

5.3.3 Conclusiones y Recomendaciones.....207

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....233

ANEXOS

A.- Teoría de equipos

B.- MATLAB y SIMULINK

C.- Diagrama Eléctrico del control del proyecto.

D.- Diagrama Eléctrico de fuerza del proyecto.

E.- Diseño del sistema electrónico de control.

F.- Diseño Estructural (Mesa de Trabajo).

G.- Prácticas de Laboratorio

H.- Tablas de Datos y archivos de Excel.

BIBLIOGRAFIA

INDICE DE FIGURAS

Pág

FIGURA 1.1 Tabla de especificaciones de equipos.....	4
FIGURA 1.2 Sistema de control básico.....	4
FIGURA 1.1.1 Diagrama de bloques del sistema en función del tiempo.....	7
FIGURA 1.2.1 Diagrama de bloques del sistema en función de la frecuencia...8	8
FIGURA 1.3.1.1 Modelo de un motor DC.....	9
FIGURA 1.3.1.2 Funciones de transferencia del motor DC teórico.....	11
FIGURA 1.3.2.1 Modelo de un generador.....	11
FIGURA 1.3.2.2 Funciones de transferencia del generador teórico.....	13
FIGURA 1.3.3.1 Controlador de velocidad del motor.....	14
FIGURA 1.3.4.1 Control de voltaje de campo del generador.....	14
FIGURA 1.3.5.1 Tacómetro.....	15
FIGURA 1.3.6.1 Carga.....	15
FIGURA 1.3.7.1 Perturbación interna del motor.....	16
FIGURA 1.3.8.1 Perturbación interna del generador.....	17
FIGURA 1.4.1.1 Funciones de transferencia del sistema a lazo abierto (Voltaje de campo constante).....	18
FIGURA 1.4.2.1 Funciones de transferencia del sistema a lazo abierto (Velocidad constante).....	19

FIGURA 1.4.2.2 Sistema a controlar a lazo abierto.....	20
FIGURA 1.4.2.3 Sistema a controlar con relación entre variables.....	21
FIGURA 1.5.1 Sistema teórico en MatLab.....	23
FIGURA 1.5.1.1 Sistema teórico variando velocidad.....	24
FIGURA 1.5.1.2 Voltaje generado variando la velocidad del motor.....	24
FIGURA 1.5.2.1 Sistema teórico variando velocidad.....	26
FIGURA 1.5.2.2 Frecuencia generada variando la velocidad del motor.....	26
FIGURA 1.5.3.1 Sistema teórico variando voltaje de campo.....	28
FIGURA 1.5.3.2 Voltaje generado variando voltaje de campo.....	28
FIGURA 1.5.4.1 Sistema teórico variando voltaje de campo.....	30
FIGURA 1.5.4.2 Frecuencia generada variando voltaje de campo.....	31
FIGURA 1.5.5.1 Sistema teórico variando perturbación (IL).....	32
FIGURA 1.5.5.2 Voltaje generado variando perturbación.....	32
FIGURA 1.5.6.1 Sistema teórico variando perturbación (IL).....	34
FIGURA 1.5.6.2 Frecuencia generada variando perturbación.....	35
FIGURA 2.1.1.1 Modelo del sistema a lazo abierto variando V_c	39
FIGURA 2.1.1.2 Voltaje generado (V_g), Frecuencia del generador (F_g).....	40
FIGURA 2.1.2.1 Simulación del sistema variando V_f	41
FIGURA 2.1.2.2 Curvas de F_g y V_g variando V_f	42

FIGURA 2.1.3.1 Modelo a lazo abierto variando I carga.....	43
FIGURA 2.1.3.2 Curvas de F_g y V_g , variando I carga.....	44
FIGURA 3.1.1.1 Datos de placa del motor trifásico.....	47
FIGURA 3.1.1.2 Circuito equivalente teórico de un motor Dc.....	47
FIGURA 3.1.1.1.1 Frecuencia vs RPM del motor.....	49
FIGURA 3.1.1.1.2.1 Armadura vs RPM.....	50
FIGURA 3.1.2.1 Datos de placa del alternador.....	50
FIGURA 3.1.2.2 Circuito equivalente teórico del generador.....	51
FIGURA 3.1.2.1.1.1 RPM del motor vs RPM del alternador.....	52
FIGURA 3.1.2.1.2.1 Voltaje generado vs RPM del generador.....	53
FIGURA 3.1.2.1.3.1 Voltaje generado vs Voltaje de campo.....	54
FIGURA 3.1.2.1.4.1 Frecuencia generada vs RPM del generador.....	56
FIGURA 3.1.3.1 Datos de placa del tacómetro.....	57
FIGURA 3.1.3.2 Circuito equivalente teórico del tacómetro.....	58
FIGURA 3.1.3.1.1.1 RPM del motor vs RPM del tacómetro.....	59
FIGURA 3.1.3.1.2.1 Voltaje Generado vs RPM del tacómetro.....	60
FIGURA 3.1.4.1 Datos de placa del variador de frecuencia.....	61
FIGURA 3.1.4.2 Circuito equivalente teórico del variador de frecuencia.....	61
FIGURA 3.1.4.1.1.1 Voltaje de control vs Frecuencia de salida.....	63

FIGURA 3.1.5.1 Datos de placa de la carga.....	63
FIGURA 3.1.5.2 Circuito equivalente teórico de la carga.....	64
FIGURA 3.1.5.1.1.1 Curva de I vs Voltaje.....	65
FIGURA 3.1.5.1.1.2 Curva de I vs Voltaje.....	66
FIGURA 3.1.6.1.1.1 Salida de control del variador de frecuencia vs voltage de control del variador de frecuencia.....	68
FIGURA 3.1.6.1.2.1 Salida de control del voltage de campo vs voltage de campo del generador.....	69
FIGURA 3.1.6.1.3.1 Voltage del tacómetro vs entrada de voltage del tacómetro al computador.....	70
FIGURA 3.1.6.1.4.1 Voltage generado en el generador vs entrada de voltage generado al computador.....	72
FIGURA 3.1.6.1.5.1 Voltage generado en el generador vs variable de control de voltage.....	73
FIGURA 3.1.6.1.6.1 Frecuencia generada en el generador vs variable de control de frecuencia.....	75
FIGURA 3.2.1 Tarjeta de adquisición de datos PCI.....	78
FIGURA 3.2.2 Pines tarjeta PCI 6054E.....	79
FIGURA 3.2.1.1 xpcsetup.....	82

FIGURA 3.2.2.1 Sistema a lazo abierto.....	85
FIGURA 3.2.2.2 Bloques de entrada y salida de la planta, subsistema Proceso.....	86
FIGURA 3.2.2.1.1 Sistema a lazo abierto con el bloque generador de pulsos.....	87
FIGURA 3.2.2.1.2 Frecuencia del generador y voltaje generado variando V_c	88
FIGURA 3.2.2.2.1 Sistema a lazo abierto variando V_f	89
FIGURA 3.2.2.2.2 Frecuencia del generador y voltaje generado, variando V_f	90
FIGURA 3.2.2.3.1 Frecuencia del generador y voltaje generado, con perturbación.....	92
FIGURA 3.3.2.1 Sistema a lazo abierto con desacoplador.....	101
FIGURA 3.3.2.1.1 Sistema a lazo abierto variando V_c	102
FIGURA 3.3.2.1.2 Gráfica de f_g y v_c	103
FIGURA 3.3.2.1.3 Ventana IDENT.....	104
FIGURA 3.3.2.1.4 Import Data.....	105
FIGURA 3.3.2.1.5 Ventana Ident con carga de los datos.....	106
FIGURA 3.3.2.1.6 (A) Datos procesados; (B) Voltaje control, señal de	

entrada y frecuencia generador, señal de salida.....	107
FIGURA 3.3.2.1.7 (A) Modelos estimados; (B) Modelos de la señal de salida.....	109
FIGURA 3.3.2.1.8 Modelo $n4s2$	110
FIGURA 3.3.2.1.9 Función de transferencia del modelo $n4s2$	111
FIGURA 3.3.2.1.10 Función de transferencia del modelo en transformada Z.....	112
FIGURA 3.3.2.1.11 Función de transferencia en Transformada de Laplace.....	113
FIGURA 3.3.2.2.1 Sistema a lazo abierto variando V_f	114
FIGURA 3.3.2.2.2 Gráfico de v_g y v_f	115
FIGURA 3.3.2.2.3 (A) Modelos estimados del sistema V_g/V_f ; (B) Modelo $n4s1$	116
FIGURA 3.3.2.2.4 Función de transferencia del modelo del generador en transformada Z.....	117
FIGURA 3.3.2.2.5 Función de transferencia del generador.....	117
FIGURA 3.4.1 Herramienta SISO.....	119
FIGURA 3.4.1.1.1 Trayectoria de las raíces del sistema F_g/V_c	121
FIGURA 3.4.1.1.2 Respuesta al escalón del sistema F_g/V_c	122

	Pág
FIGURA 3.4.1.1.3 Trayectoria de las raíces del sistema con el controlador PI.....	123
FIGURA 3.4.1.1.4 Respuesta al escalón del sistema con el controlador PI.....	124
FIGURA 3.4.1.2.1 Trayectoria de las raíces del sistema V_g/V_f	125
FIGURA 3.4.1.2.2 Respuesta del sistema al escalón.....	126
FIGURA 3.4.1.2.3 Trayectoria de las raíces del sistema V_g/V_f con el controlador PI.....	127
FIGURA 3.4.1.2.4 Respuesta al escalón del sistema V_g/V_f con el controlador PI.....	128
FIGURA 3.4.2.1.1 Sistema a lazo abierto con desacoplador.....	129
FIGURA 3.4.2.1.2 Curva de frecuencia del generador.....	130
FIGURA 3.4.2.1.3 Curva de F_g	130
FIGURA 3.4.2.2.1 Curva del voltaje generado.....	132
FIGURA 3.4.2.2.2 Voltaje generado.....	132
FIGURA 3.4.2.2.3 Sistema a lazo cerrado con controlador empírico.....	133
FIGURA 3.4.2.2.4 (A) Tabla de tendencias de parámetros (B) Curvas características de un sistema.....	134
FIGURA 3.4.3.1 Bloques de entrada y salida de señales.....	136
FIGURA 3.4.3.2 Flujo de señal en modo automático.....	138

FIGURA 3.4.3.3. Ubicación de selectores manual – automático.....	140
FIGURA 3.4.3.4 Flujo de señal en modo manual.....	143
FIGURA 3.4.3.5 Pantalla del PC Target (computador de campo).....	144
FIGURA 4.1.1 Cambio del valor de seteo.....	151
FIGURA 4.1.2 Sistema con el cambio del seteo.....	151
FIGURA 4.1.3 Curva de voltaje a 8 Vdc de seteo.....	152
FIGURA 4.1.4 Curva de frecuencia sin variar el seteo.....	152
FIGURA 4.1.5 Curva de voltaje y frecuencia a 8 Vdc frente a Perturbaciones.....	153
FIGURA 4.2.1 Sistema utilizado para análisis de sobre-carga.....	155
FIGURA 4.2.2 Señales frente a un carga de mayor consumo.....	156
FIGURA 5.1.2.1 Diagrama de bloque del sistema.....	160
FIGURA 5.1.2.2 Curva y parámetros característicos en función del tiempo...	162
FIGURA 5.1.3.1 Esquema de un motor DC.....	163
FIGURA 5.1.3.2 Función de transferencia de un motor DC	165
FIGURA 5.1.3.3 Esquema de un generador DC.....	165
FIGURA 5.1.3.4 Función de transferencia del generador.....	168
FIGURA 5.1.3.5 Función de transferencia perturbación del motor.....	169
FIGURA 5.1.3.6 Función de transferencia de perturbación del generador....	170

	Pág
FIGURA 5.1.3.7 Sistema a controlar.....	171
FIGURA 5.1.3.8 Sistema a controlar (Lazo cruzado).....	172
FIGURA 5.1.4.2.1 Tablas de parámetros de la práctica.....	174
FIGURA 5.1.4.3.1 Programa Sistema Teórica.....	174
FIGURA 5.1.4.3.2 Curva característica de un sistema de control.....	175
FIGURA 5.1.4.3.1.1 Sistema teórico variando velocidad.....	176
FIGURA 5.1.4.3.1.2 Señal de voltaje.....	177
FIGURA 5.1.4.3.2.1 Sistema teórico variando velocidad.....	178
FIGURA 5.1.4.3.2.2 Señal de frecuencia.....	179
FIGURA 5.1.4.3.3.1 Sistema teórico variando voltaje de campo.....	180
FIGURA 5.1.4.3.3.2 Señal de voltaje.....	181
FIGURA 5.1.4.3.4.1 Sistema teórico variando voltaje de campo.....	183
FIGURA 5.1.4.3.4.2 Señal de frecuencia.....	183
FIGURA 5.1.4.3.5.1 Sistema teórico variando perturbación (IL).....	184
FIGURA 5.1.4.3.5.2 Señal de voltaje.....	185
FIGURA 5.1.4.3.6.1 Sistema teórico variando perturbación (IL).....	187
FIGURA 5.1.4.3.6.2 Señal de frecuencia.....	187
FIGURA 5.1.4.4.1 Tabla de datos obtenidos.....	190
FIGURA 5.2.2.1.1 Esquema general de un proceso 2×2	193

	Pág
FIGURA 5.2.2.2.1 Sistema 2x2.....	194
FIGURA 5.2.2.3.1 Sistema a lazo cerrado.....	196
FIGURA 5.2.3.1 Sistema a lazo abierto.....	200
FIGURA 205 Tabla de datos.....	201
FIGURA 5.2.3.3 Lazo abierto con desacoplador.....	205
FIGURA 5.3.2.1.1 Sistema lazo abierto con desacoplador.....	208
FIGURA 5.3.2.1.2 Curva de frecuencia del generador.....	209
FIGURA 5.3.2.1.3 Curva de frecuencia del generador con t1 y t2.....	209
FIGURA 5.3.2.1.4 Curva del voltaje generado.....	211
FIGURA 5.3.2.1.5 Curva de voltaje generado con t1 y t2.....	212
FIGURA 5.3.2.1.6 Sistema a lazo cerrado con controladores calculados de forma empírica.....	213
FIGURA 5.3.2.2.1 Import Data.....	215
FIGURA 5.3.2.2.2 (A) Datos procesados; (B) Voltaje control, señal de entrada y frecuencia generador, señal de salida.....	217
FIGURA 5.3.2.2.3 (A) Modelos estimados; (B) Modelos de la señal de salida.....	218
FIGURA 5.3.2.2.4 Trayectoria de las raíces del sistema F_g/V_c	221
FIGURA 5.3.2.2.5 Respuesta al escalón del sistema F_g/V_c	222

FIGURA 5.3.2.2.6 Trayectoria de las raíces del sistema Fg/Vc con Controlador PI.....	223
	Pág
FIGURA 5.3.2.2.7 Respuesta al escalón del sistema con el controlador PI...	224
FIGURA 5.3.2.2.8 A) Modelos estimados del sistema, B) Modelos $m4s1$	225
FIGURA 5.3.2.2.9 Trayectoria de las raíces del sistema Vg/Vf	227
FIGURA 5.3.2.2.10 Respuesta del sistema al escalón.....	228
FIGURA 5.3.2.2.11 Trayectoria de las raíces del sistema Vg/Vf con controlador PI.....	229
FIGURA 5.3.2.2.12 Respuesta al escalón del sistema Vg/Vf con el controlador PI.....	230
FIGURA 5.3.2.2.13 Sistema a lazo cerrado con controladores calculados de forma analítica.....	231

INTRODUCCION

Los sistemas de automatización por software son hoy en día el mejor ejemplo de control y cuya utilización se encuentra en aumento en el mercado por las facilidades que brinda tales como: bajo costo de operación, exactitud y velocidad en el trabajo.

Mucho de los sistemas que se encuentran en el mercado son promocionados por su exactitud y velocidad de reacción, este se logra colocando en el sistema los llamados controladores ya sea: Proporcional (P), Integral (I), Derivativo (D), Proporcional – Integral (PI) o Proporcional – Integral – Derivativo (PID).

En este estudio se observará como realizar el sistema de control de un sistema que primeramente tiene dos variables de control y dos variables controladas, también llamado sistema multivariable. Estos sistemas multivariables tienen una características de relación entre las variables propia del proceso, esta relación deberá ser antes eliminada para poder controlar el sistema. Por medio de un desacoplador podremos eliminar la relación; el desacoplador son constantes obtenidas de manera analítica que separa la dependencia de las variables permitiendo así un control de las mismas.

Nuestro sistema realizado bajo MatLab el cuál es un software que nos permite realizar operaciones matemáticas a gran velocidad, junto con SIMULINK el cuál nos permite simular procesos por medio de bloques; controlará un proceso real valiéndose de las herramientas de control automático y determinando el correcto controlador PID de forma analítica y empírica, que nos permita obtener la exactitud y velocidad deseada en el proceso real.

Para poder controlar cualquier proceso antes debemos poder medir las variables del mismo, para conocer la condición del proceso real. La toma de datos de las variables de campo y su control se la realizará por medio de un computador; siendo esta una actividad de control remoto muy utilizada dentro de la industria.

Este sistema será parte de los modelos didácticos de aprendizaje del Laboratorio de Control Automático; de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación (FIEC), por lo cuál dentro de la información de la tesis contaremos con tres prácticas de laboratorio para que sean realizadas por los estudiantes de la FIEC.

CAPITULO 1

1. SISTEMA A CONTROLAR

El objetivo de nuestra tesis es controlar un sistema de generación de energía eléctrica, para ello necesitamos dos equipos principales: el motor y el generador. El motor será el responsable de proporcionar la fuerza motriz del eje del generador que para nuestro caso utilizaremos un alternador de carro.

Todo sistema que se desea controlar, primero se debe saber como se encuentran sus parámetros de trabajo, por lo cuál utilizaremos para identificarlos diferentes equipos (sensores) que encontremos en el mercado; los cuales nos permitirán medir las variaciones y poderlas controlar.

A continuación indicaremos uno a uno los equipos que vamos a utilizar, así como sus funciones de transferencias teóricas con lo cuál realizaremos los análisis de estabilidad y control en la simulación.

Para poder realizar un trabajo didáctico y de fácil ensamblaje dentro de un laboratorio se ha decidido utilizar los siguientes equipos mostrados en la figura 1.1.

MOTOR:	Trifásico de 220 V, asíncrono, motor jaula de ardilla de 0.5 HP
GENERADOR:	Alternador de carro con regulador de voltaje externo
CARGA:	Focos de carro de 12 V - 4 W

FIGURA 1.1 TABLA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS

La documentación técnica de estos equipos así como su principio de funcionamiento, serán presentados en el Anexo A. En la figura 1.2 se muestra el sistema básico a controlar.

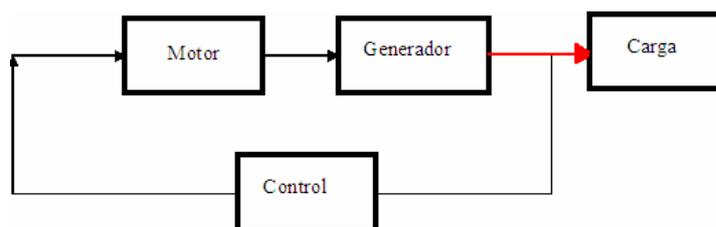


FIGURA 1.2 SISTEMA DE CONTROL BASICO

En cada equipo las variables que se controlarán y utilizarán en nuestro sistema son:

- **Motor.-** Es el equipo que proporciona la fuerza motriz en un sistema de generación, este sistema de movimiento puede ser aéreo, hidráulico, térmico, etc. Sus variables son:
 - Frecuencia de Entrada
 - Velocidad de Salida

- **Generador (alternador).-** Es el equipo donde se genera el voltaje por medio del principio generación magnética, el alternador simula los grandes sistema de generación que manejan el mismo principio pero con muchas mayores potencia. Sus variables son:
 - Velocidad de Entrada
 - Voltaje de campo de entrada
 - Voltaje de Salida
 - Frecuencia de Salida

- **Carga.-** La carga simula las grandes ciudades y su comportamiento aleatorio de potencia consumida, que causa las perturbaciones en el sistema nacional interconectado de energía eléctrica. Sus variables son:
 - Voltaje de Entrada
 - Frecuencia de entrada

Los equipos utilizados para medir y controlar son:

- Tacómetro analógico
- Interfaces de Conversión y estabilización de señales
- Computador (XPC TARGET - MATLAB – Host)
- Sistema de potencia de señales del computador

1.1 Modelo del diagrama de bloques en función del tiempo

En la figura 1.1.1 se muestra un diagrama del bloque inicial del sistema a controlar, donde se muestra los bloques de acción tales como: bloque de motor, generador, bloques de perturbaciones, bloques de retroalimentación.

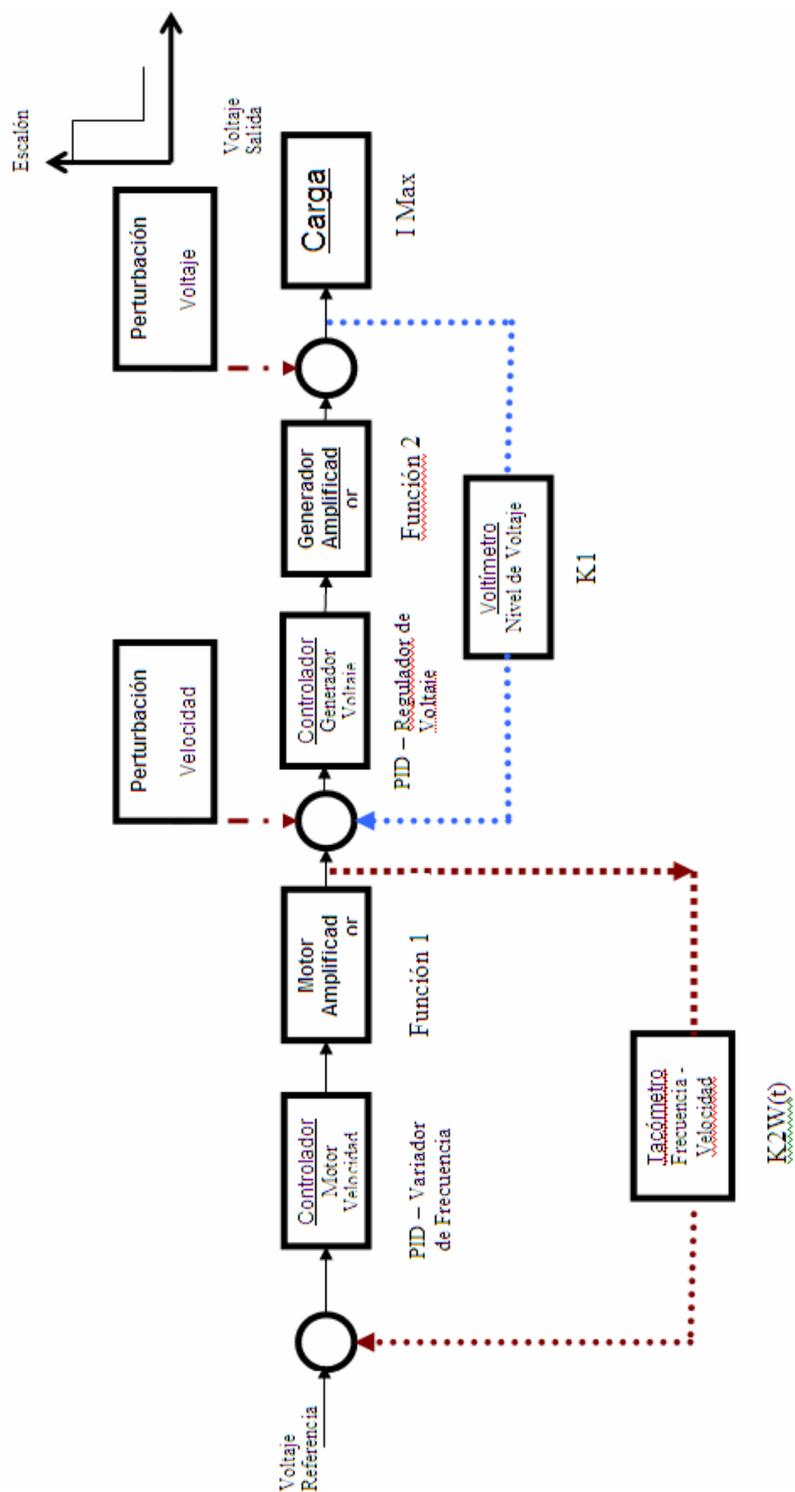


FIGURA 1.1.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA EN FUNCION DEL TIEMPO

1.2 Modelo del diagrama de bloques en función de la frecuencia

En la figura 1.2.1 se muestra el mismo bloque en función de la frecuencia, realizada después de la Transformada de Laplace.

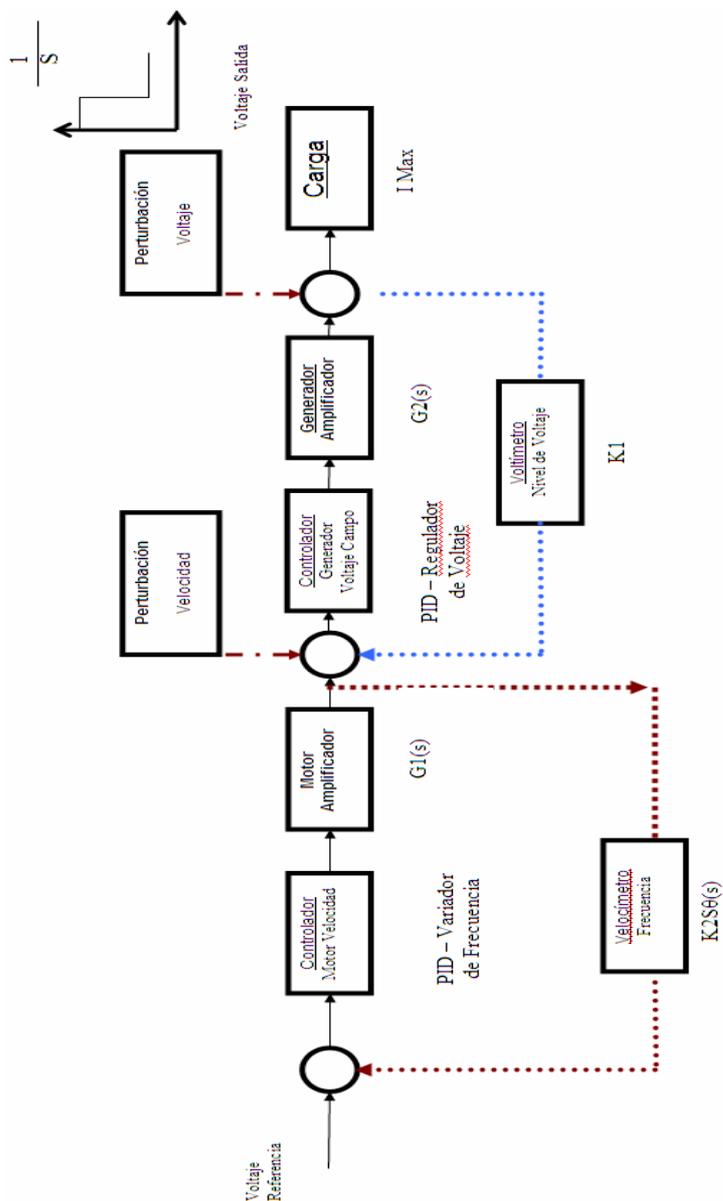


FIGURA 1.2.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA EN FUNCION DE LA FRECUENCIA

1.3 Descripción de los bloques

1.3.1 Motor

El modelo de motor que se muestra en la figura 1.3.1.1, es de un motor DC con control de velocidad por medio del voltaje de campo, el cual se lo utiliza para poder entender con mayor facilidad el principio de funcionamiento; el motor que se utilizará en la planta es de corriente AC trifásico.

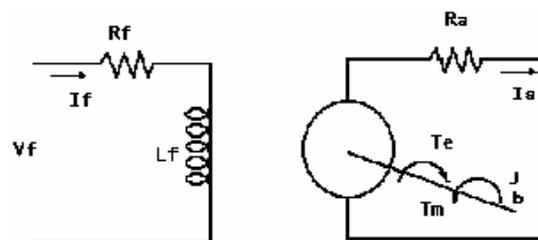


FIGURA 1.3.1.1 MODELO DE UN MOTOR DC

Como motor tenemos que el torque en el eje es variable, y que el torque mecánico (T_m) es igual al torque eléctrico (T_e).

$$T_e = T_m \quad ; \quad \phi = K_f \cdot i_f$$

$$T_e = K_1 \cdot \phi \cdot i_a(t) ;$$

$$T_e = K_1 \cdot K_f \cdot i_f \cdot i_a(t); \text{ siendo } i_a \text{ constante} \Rightarrow K_m = K_1 \cdot K_f \cdot i_a(t)$$

$$T_e = K_m \cdot i_f$$

$V_f = R_f i_f + L_f \cdot d(i_f)/dt$ (función tomando en cuenta los estados transitorios)

$$V(s) = R_f i_f(s) + L_f \cdot s i_f(s)$$

$$V(s) = i_f(s) [R_f + s \cdot L_f] + V_c(s)$$

$$i_f(s) = \frac{V(s) - V_c(s)}{[R_f + s \cdot L_f]}$$

$V_c(s) = K_c \cdot \omega_m(s)$ voltaje inducido por la fuerza contra electromotriz (**Perturbación interna del motor**)

$$T_e = K_m \cdot V(s) / [R_f + s \cdot L_f]$$

$$T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + b \cdot \omega_m$$

$$T_m = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

$$T_m = J \theta(s) s^2 + b \theta(s) s$$

$$T_m = \theta_m(s) [J s^2 + b s]$$

$$K_m \cdot V(s) / [R_f + s \cdot L_f] = \theta_m(s) [J s^2 + b s]$$

$$K_m \cdot / [R_f + s \cdot L_f] [J s^2 + b s] = \theta_m(s) / V(s)$$

$$\underline{\theta_m(s) / V(s) = K_m \cdot / [R_f + L_f] [J s^2 + b s]}$$

Como este bloque incluye una etapa de amplificación de señal, que nos permitirá realizar ajuste de señal en el

sistema real; la función de transferencia se observa en la figura 1.3.1.2:

$$\underline{V(s) / V_{in} = K1}$$

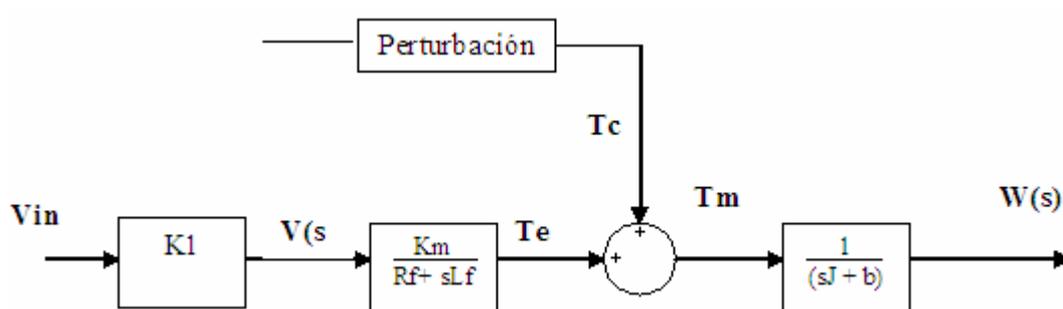


FIGURA 1.3.1.2 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL MOTOR DC TEORICO

1.3.2 Generador

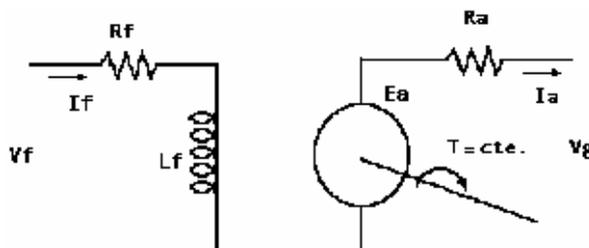


FIGURA 1.3.2.1 MODELO DE UN GENERADOR

En el diagrama de bloque del generador se presentan condiciones de trabajo que serán estudiadas de forma separada en la parte teórica y revisada en el capítulo cuatro de forma práctica, las condiciones son: velocidad de entrada constante y voltaje de campo constante.

$$E_a = K \phi \omega_g$$

$$\phi = B \cdot d \cdot l$$

$$B = \mu \cdot H$$

$$H = K \cdot i_f$$

$$i_f = V_f / [R_f + s L_f]$$

$$E_a = K' [V_f / (R_f + s L_f)] \cdot \omega_g$$

$$E_a = K [u \cdot d \cdot l \cdot k] i_f \cdot \omega_g$$

$$\underline{E_a = K' i_f \cdot \omega_g}$$

- Velocidad Constante:

Donde $\omega_g = \omega_m = \text{cte.}$ entonces $K'' = K' \cdot \omega_g$

$$E_a / V_f = K' \cdot \omega_g / (R_f + s L_f)$$

$$E_a / V_f = K'' / (R_f + s L_f)$$

- Voltaje de Campo Constante:

Donde $V_f = \text{cte.}$ entonces $K''' = K' \cdot V_f$

$$E_a / \omega_g = K' \cdot V_f / (R_f + s L_f)$$

$$E_a / \omega_g = K''' / (R_f + s L_f)$$

$$V_g = E_a - V_c$$

$$V_g = E_a - \underbrace{(I_a \cdot R_a)}_{\text{Perturbación interna del Generador}}$$

En el generador existen dos variables a controlar, (como se observa en la figura 1.3.2.2) la primera antes vista es el

voltaje generado que tiene dos condiciones, voltaje de campo constante y velocidad constantes. La segunda variable a controlar es la frecuencia de salida que depende directamente de la velocidad de entrada, cuya función de transferencia se muestra a continuación:

$$F_{eg} = W_g \cdot P / 120 \quad (P = \text{números de polos del generador})$$

$$F_{eg} / W_g = P / 120$$

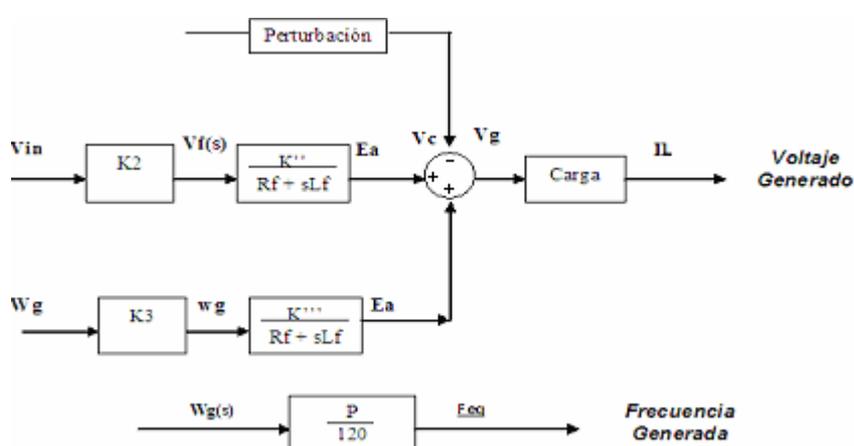


FIGURA 1.3.2.2 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL GENERADOR TEORICO

1.3.3 Controlador de velocidad del motor

Este controlador está conformado por dos partes: el PID que nos ayudará a mantener el sistema estable y el variador de frecuencia que controlará el nivel de velocidad

del motor y así mantener la frecuencia generada constante, figura 1.3.3.1.

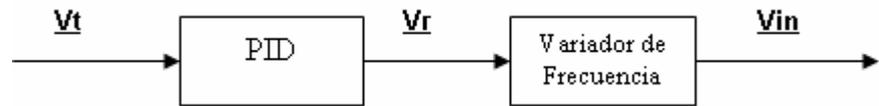


FIGURA 1.3.3.1 CONTROLADOR DE VELOCIDAD DEL MOTOR

1.3.4 Control de voltaje de campo del generador

Este controlador está conformado por dos partes: el PID que nos ayudará a mantener el sistema estable y el regulador de voltaje DC que controlará el nivel de voltaje que le llegue al devanado de campo del generador y así su nivel de voltaje generado, figura 1.3.4.1.

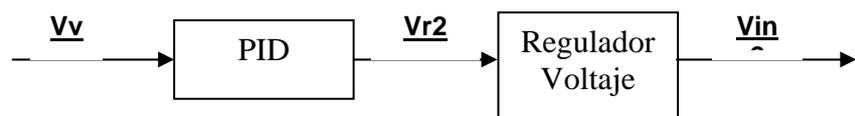


FIGURA 1.3.4.1 CONTROL DE VOLTAJE DE CAMPO DEL GENERADOR

1.3.5 Tacómetro

El tacómetro convierte la señal de velocidad medida en el eje del motor en voltaje, el cuál servirá como referencia para el controlador y así poder definir o modificar la frecuencia a que debe ser alimentado el motor manteniendo la velocidad constante a la salida, figura 1.3.5.1.

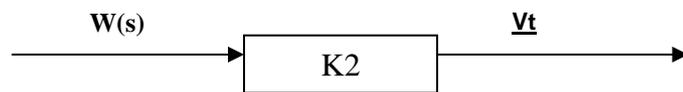


FIGURA 1.3.5.1 TACOMETRO

1.3.6 Carga

La carga recibirá el voltaje generado V_g , relacionándolo con la resistencia de la misma (R_L) tenemos el dato necesario para el lazo de retroalimentación interna del generador, figura 1.3.6.1.

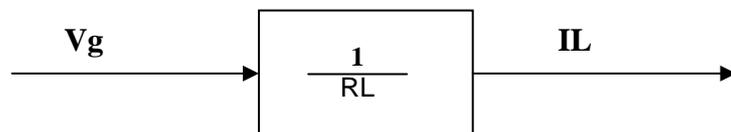


FIGURA 1.3.6.1 CARGA

1.3.7 Perturbación interna del motor

Es la perturbación causada por el torque inducido por el voltaje contra electromotriz, el cuál está en función de la corriente de carga producida en el generador figura 1.3.7.1.

$$T_c = K_1 \cdot \phi \cdot i_l(t) \quad \phi = K_f \cdot i_f$$

$$T_c = K_1 \cdot K_f \cdot i_f \cdot i_l(t) \quad \text{como } i_f = \text{const.}$$

$$\text{Entonces } K_c' = K_1 \cdot K_f \cdot i_f$$

$$T_c = K_c' \cdot i_l(t) \quad T_c / I_l(s) = K_c'$$

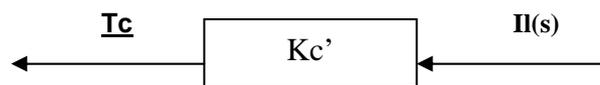


FIGURA 1.3.7.1 PERTURBACION INTERNA DEL MOTOR

1.3.8 Perturbación interna del generador

Es la perturbación causada por el voltaje contra electromotriz generado por la corriente de la carga.

$$V_g = E_a - V_c \quad V_c = i_a \cdot R_a$$

$$V_g = E_a - i_a \cdot R_a \longrightarrow \text{Perturbación interna del Generador}$$

$$V_c / i_a = R_a \quad \text{como } i_a = I_L \text{ entonces:}$$

$$V_c / I_l = R_a$$

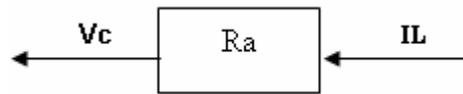


FIGURA 1.3.8.1 PERTURBACION INTERNA DEL GENERADOR

1.4 Funciones de Transferencia

Dado que nuestro sistema tiene dos variables a controlar (voltaje y frecuencia generada), por medio de dos variables de control (velocidad de motor y voltaje de campo del generador); se ha procedido a separar las funciones de transferencias según la variable de control.

1.4.1 Funciones de transferencia Teórica a Lazo Abierto - (Voltaje de Campo Constante)

En la figura 1.4.1.1 se ha obtenido la función de transferencia del sistema teórico manteniendo el voltaje de campo del generador constante. En este bloque tenemos el voltaje generado y la frecuencia generada en constante variación a relación directa del cambio de la velocidad.

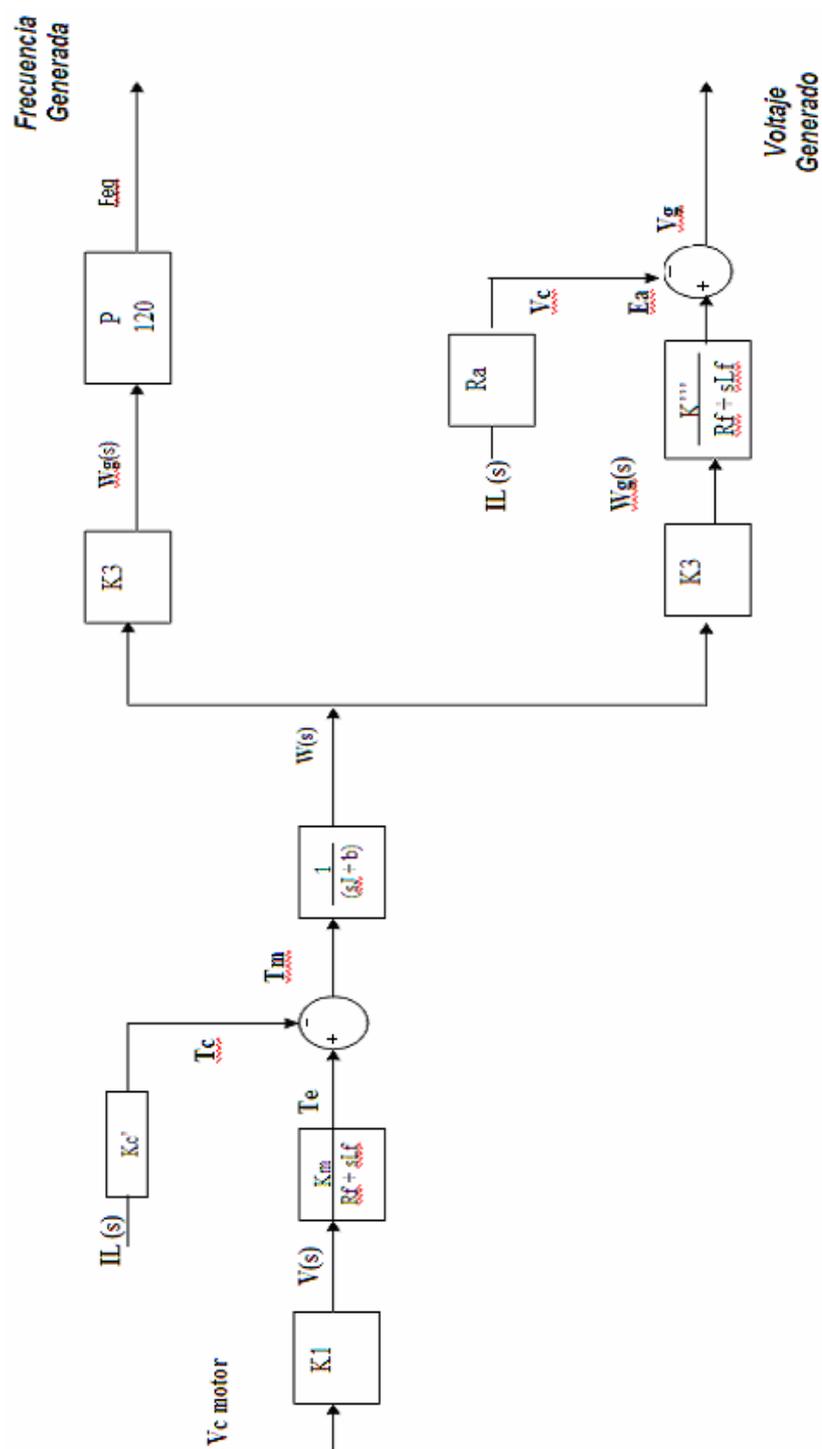


FIGURA 1.4.1.1 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA A LAZO ABIERTO (VOLTAJE DE CAMPO CONTANTE)

1.4.2 Funciones de transferencia Teórica a Lazo Abierto - (Velocidad Constante)

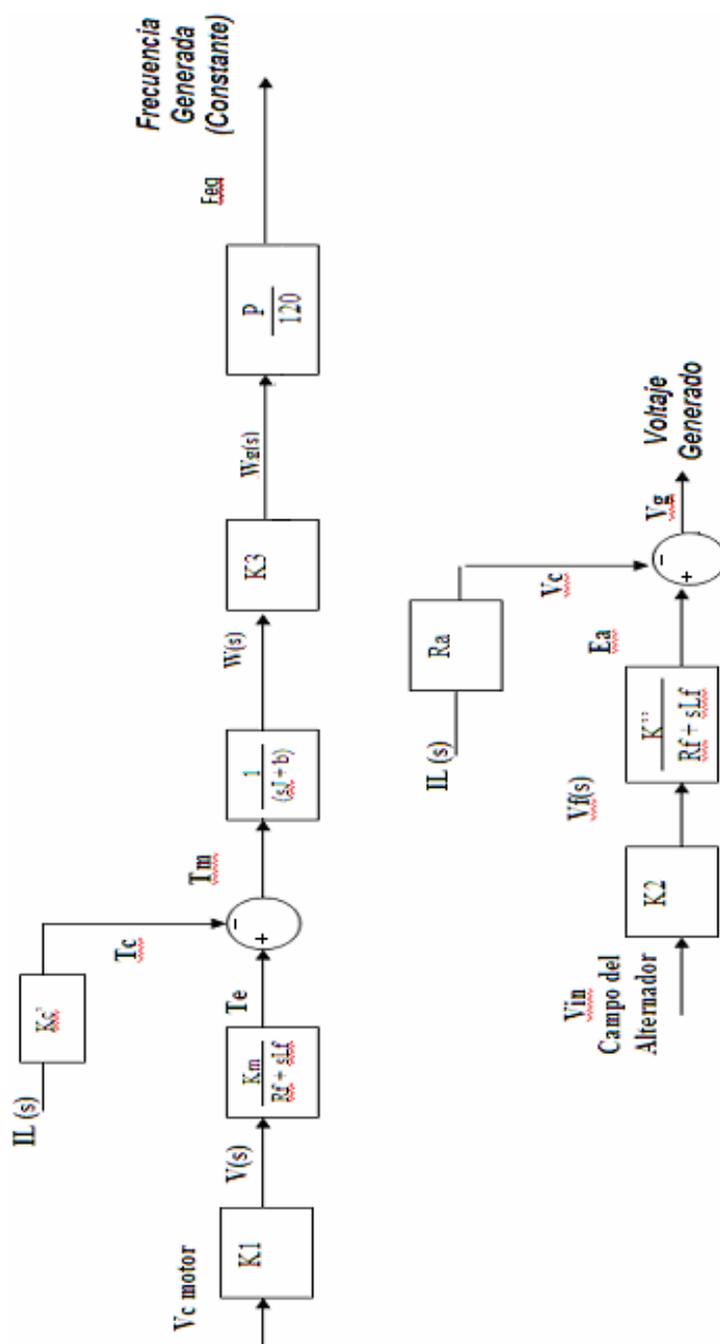


FIGURA 1.4.2.1 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA A LAZO ABIERTO (VELOCIDAD CONSTANTE)

En la figura 1.4.2.1 se ha obtenido la función de transferencia del sistema teórico, manteniendo la velocidad del motor constante. En este bloque tenemos el voltaje generado en constante cambio a relación directa a la variación del voltaje de campo del generador y la frecuencia se mantiene constante.

Para poder identificar mejor el sistema, unificaremos los gráficos mostrando mejor las variables a controlar y sus relaciones entre ellas, figura 1.4.2.2:

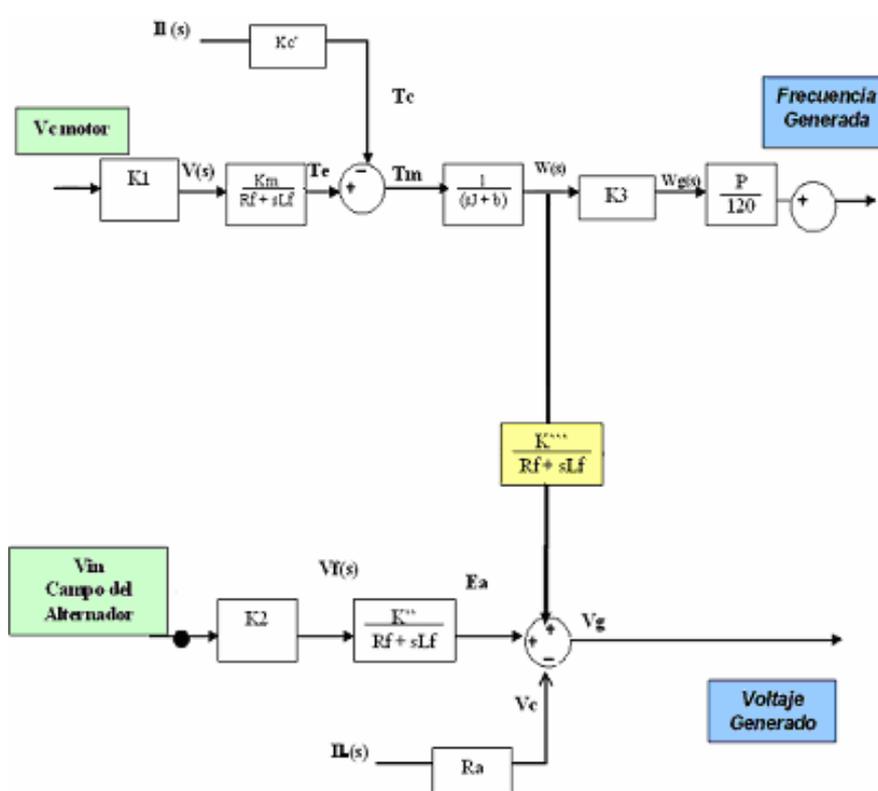


FIGURA 1.4.2.2 SISTEMA A CONTROLAR A LAZO ABIERTO

Para obtener las funciones de transferencia entre las variables de control y las variables controladas de la siguiente manera:

$$V_g = f (V_c, V_{in}) = K_1 V_c + K_2 V_{in}$$

$$F_g = f (V_c, V_{in}) = K_3 V_c + K_4 V_{in}$$

Debemos modificar el gráfico buscando las relaciones entre variables deseadas como se muestra a continuación:

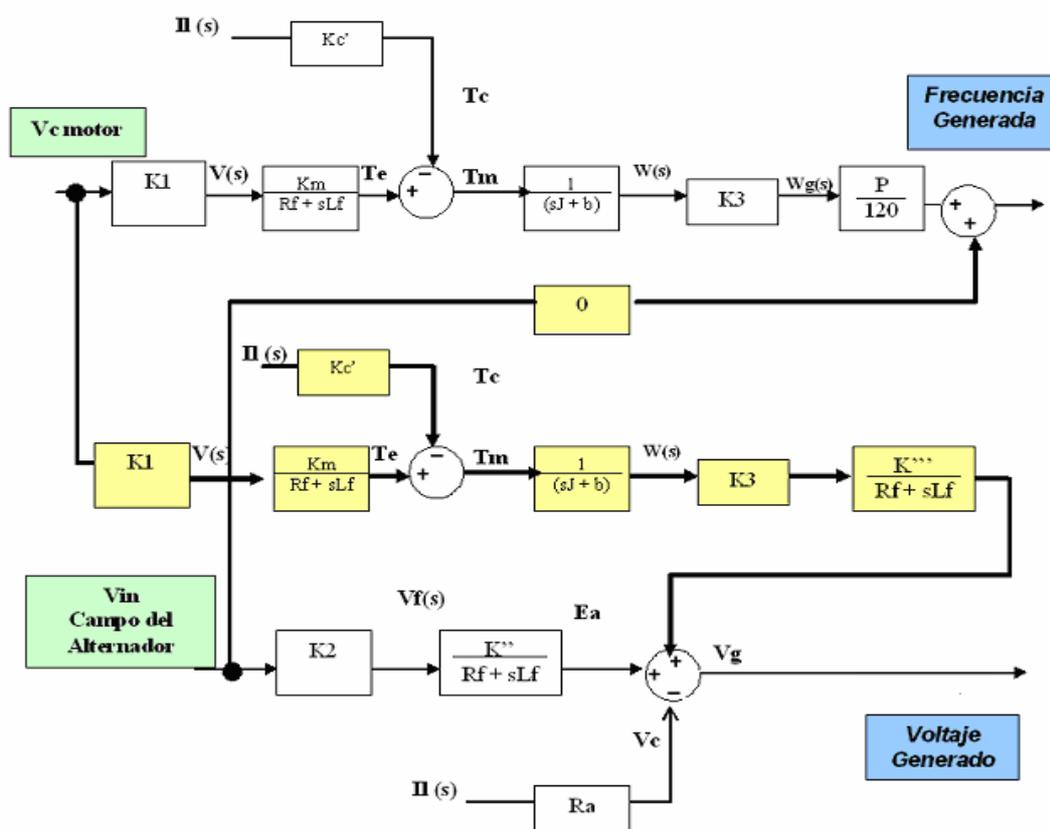


FIGURA 1.4.2.3 SISTEMA A CONTROLAR CON RELACION ENTRE VARIABLES

En la figura 1.4.2.3 se observa mejor las relaciones entre las variables y podemos notar que nuestro sistema tiene un comportamiento de lazo cruzado, es decir, existe una relación intrínseca entre las variables de tal manera que al modificar una de ellas automáticamente se modifica la otra variable.

1.5 Sistema teórico en Simulink

Este sistema es ingresado a simulink para poder obtener las curvas del sistema frente a perturbaciones, con lo cuál podremos determinar el grado de la función característica de nuestro sistema y su nivel de estabilidad entre cada variable.

Las relaciones que se debe obtener son las siguientes:

1. Voltaje Generado variando velocidad.
2. Frecuencia Generada variando velocidad.
3. Voltaje Generado variando Voltaje de Campo.
4. Frecuencia Generada variando Voltaje de Campo.
5. Voltaje Generado variando Perturbación (IL).
6. Frecuencia Generada variando Perturbación (IL).

Nuestro sistema teórico en MATLAB es el siguiente, figura 1.5.1.

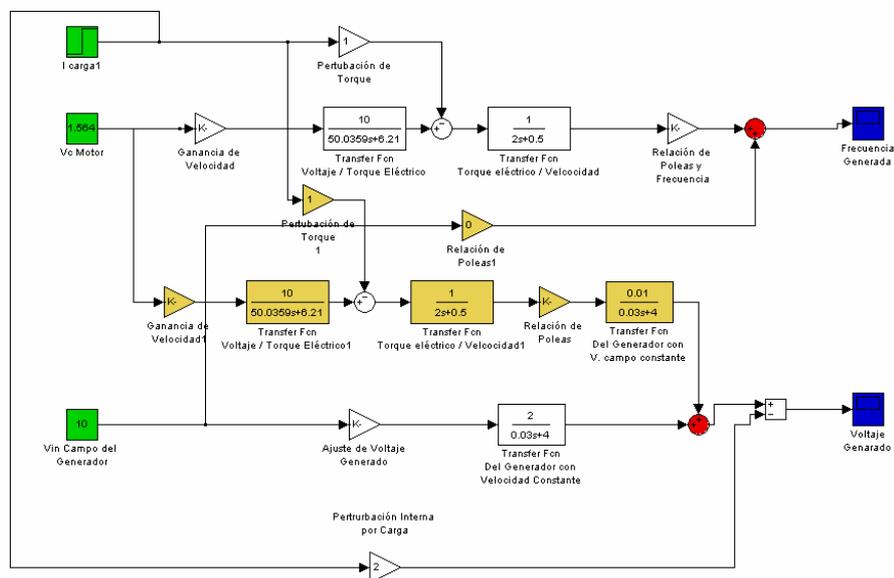


FIGURA 1.5.1 SISTEMA TEORICO EN MATLAB

1.5.1 Voltaje Generado variando Velocidad

Para poder obtener esta relación mantenemos el voltaje de campo y la perturbación en valor cero, produciendo un tren de pulso unitario en la variable de control de la velocidad, como se muestra en la figura 1.5.1.1.

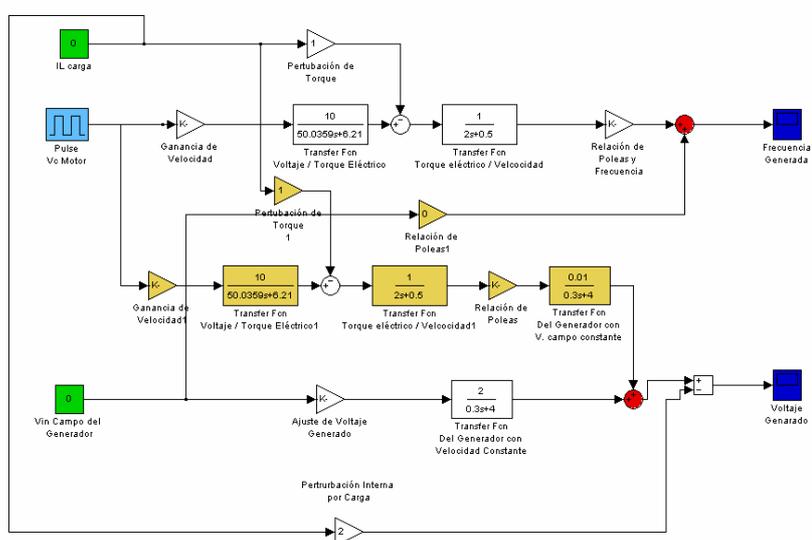


FIGURA 1.5.1.1. SISTEMA TEORICO VARIANDO VELOCIDAD

De este sistema obtenemos las siguiente gráfica 1.5.1.2

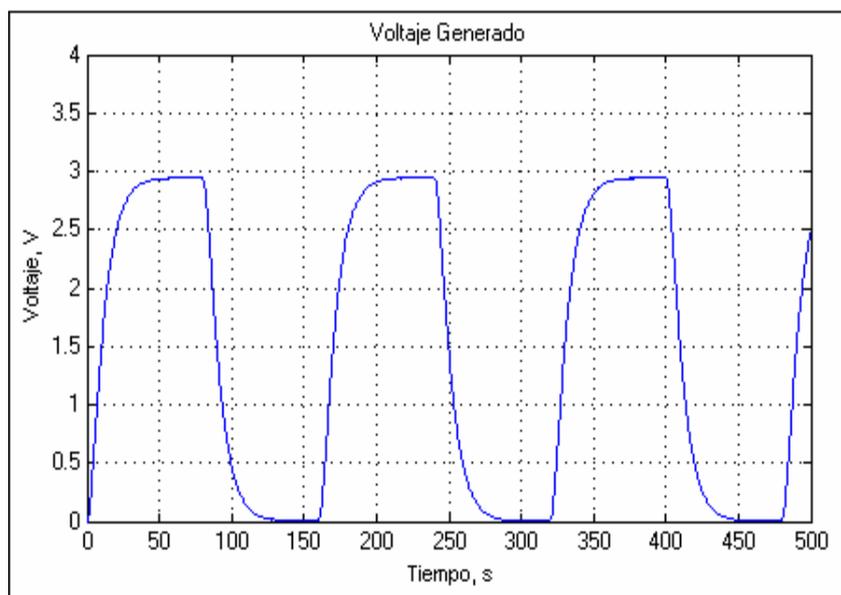


FIGURA 1.5.1.2 VOLTAJE GENERADO VARIANDO LA VELOCIDAD DEL MOTOR

Lo que podemos deducir de esta gráfica es que la variable de voltaje generado es directamente proporcional a la variable de control de velocidad, es decir que mientras mayor velocidad tenga el motor mayor será el voltaje generado.

Esta curva es de carácter de segundo orden con un tiempo de subida de 20 s aproximadamente y un tiempo de estabilización de 50 s., con una estabilidad perenne frente al tren de pulsos de variaciones colocada.

1.5.2 Frecuencia Generada variando Velocidad

Para poder obtener esta relación mantenemos el voltaje de campo y la perturbación en valor cero, produciendo un tren de pulso unitario en la variable de control de la velocidad, como se muestra en la figura 1.5.2.1:

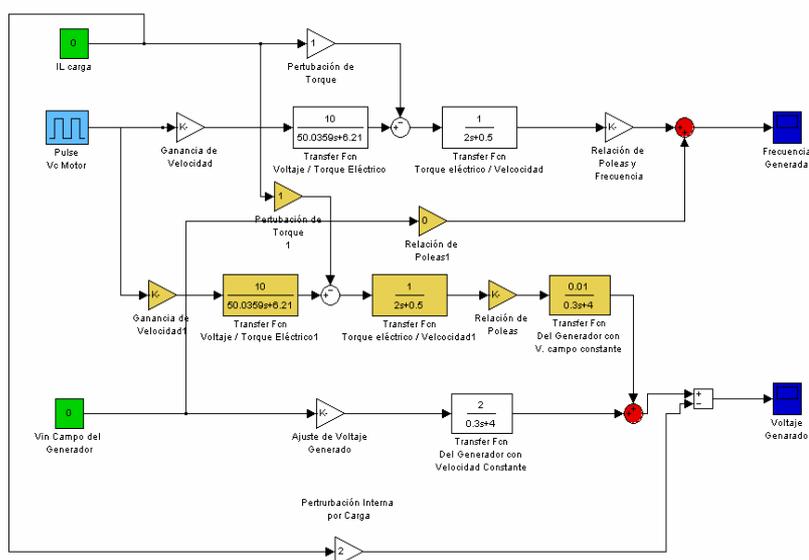


FIGURA 1.5.2.1 SISTEMA TEORICO VARIANDO VELOCIDAD

De este sistema obtenemos las siguiente gráfica 1.5.2.2

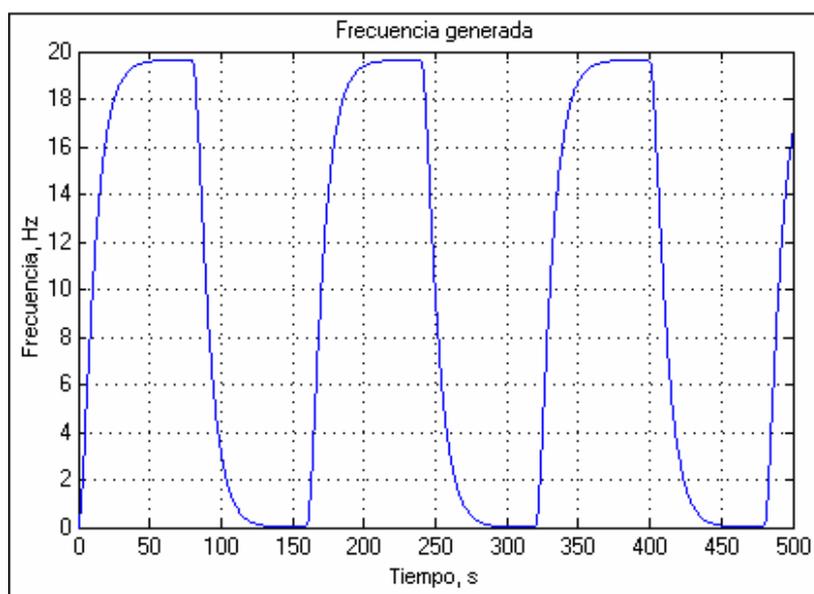


FIGURA 1.5.2.2 FRECUENCIA GENERADA VARIANDO LA VELOCIDAD DEL MOTOR

Lo que podemos deducir de esta gráfica es que la variable de frecuencia generada igual que el voltaje generado es directamente proporcional a la variable de control de velocidad, es decir que mientras mayor velocidad tenga el motor mayor será la frecuencia generada.

Esta curva también es de carácter de segundo grado con un tiempo de subida de 25 s. aproximadamente y un tiempo de estabilización de 60 s., con una estabilidad perenne frente al tren de pulso de variaciones colocada.

1.5.3 Voltaje Generado variando Voltaje de Campo

Para poder obtener esta relación mantenemos la velocidad y la perturbación en valor cero, produciendo un tren de pulso unitario en la variable de control de voltaje de campo, como se muestra en la figura 1.5.3.1:

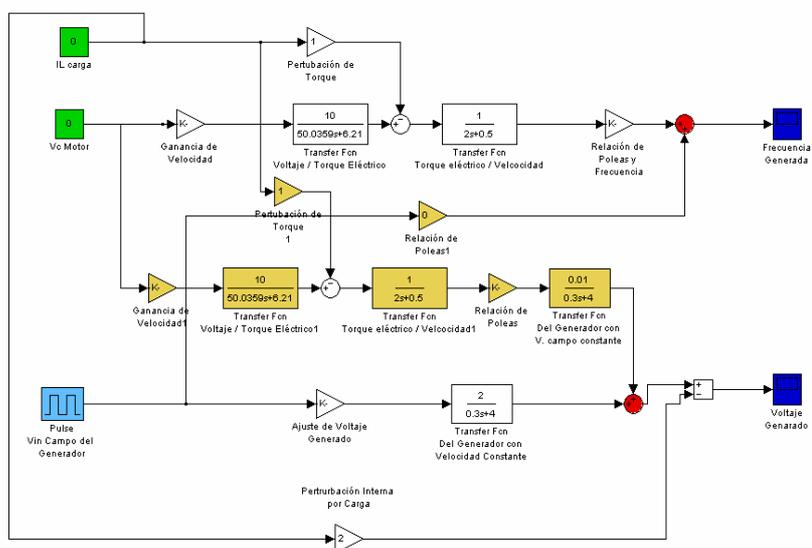


FIGURA 1.5.3.1 SISTEMA TEORICO VARIANDO VOLTAJE DE CAMPO

De este sistema obtenemos las siguiente gráfica 1.5.3.2.

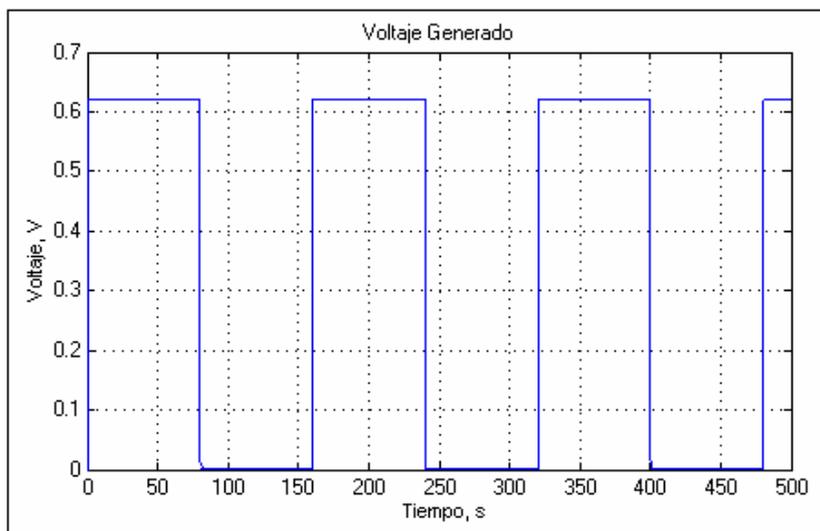


FIGURA 1.5.3.2 VOLTAJE GENERADO VARIANDO VOLTAJE DE CAMPO

Lo que podemos deducir de esta gráfica es que la variable de voltaje generado es directamente proporcional a la variable de control de voltaje de campo, es decir que mientras mayor voltaje de campo exista mayor será el voltaje generado.

Esta curva también es de carácter de primer grado con un tiempo de subida muy pequeño (0.18 s.), tanto que podemos decir que es instantánea la reacción de esta variable y un tiempo de estabilización igualmente muy rápida (0.22 s.), con una estabilidad perenne frente al tren de pulso de variaciones colocada.

De esto concluimos que el voltaje generado varía más rápido con la variable de control de voltaje de campo que con la de velocidad; esto se debe a que las variables eléctricas (voltaje de campo) tienen un menor tiempo de reacción que las variables mecánicas (velocidad).

1.5.4 Frecuencia Generada variando Voltaje de Campo

Para poder obtener esta relación mantenemos la velocidad y la perturbación en valor cero, produciendo un tren de pulso unitario en la variable de control de voltaje de campo, como se muestra en la figura 1.5.4.1.

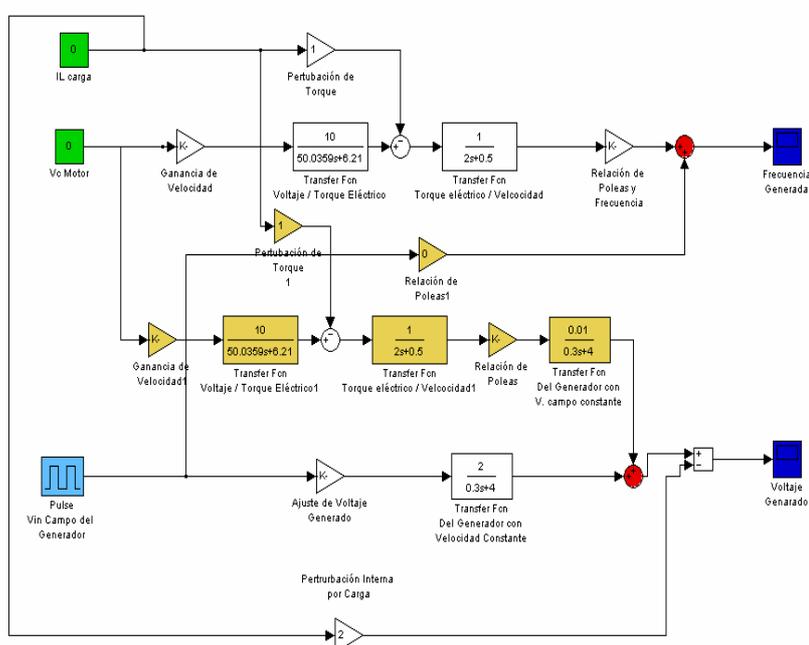


FIGURA 1.5.4.1 SISTEMA TEORICO VARIANDO VOLTAJE DE CAMPO

De este sistema obtenemos las siguiente gráfica 1.5.4.2.

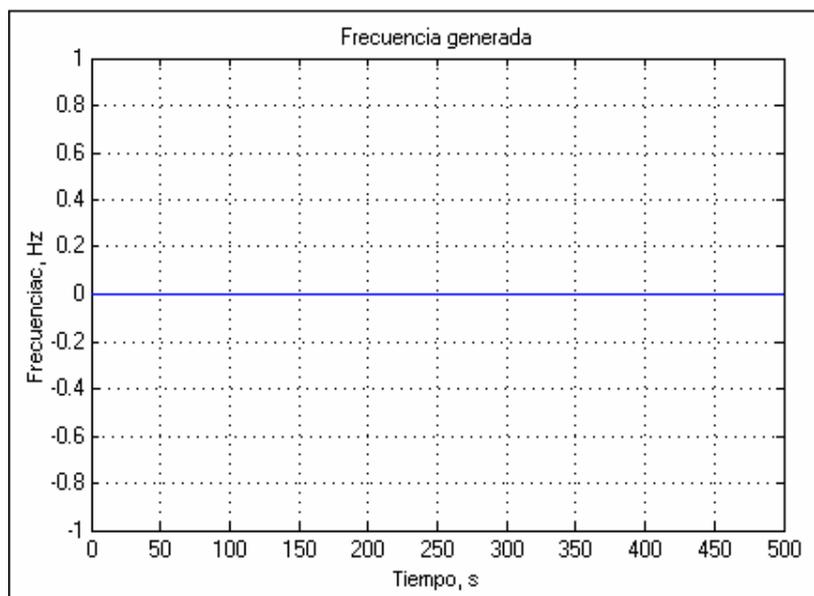


FIGURA 1.5.4.2 FRECUENCIA GENERADA VARIANDO
VOLTAJE DE CAMPO

Lo que podemos deducir de esta grafica es que la variable de frecuencia generada no es afecta por la variable de control de voltaje de campo, por lo tanto la frecuencia generada del sistema sólo depende de la variable de control velocidad.

1.5.5 Voltaje Generado variando Perturbación (IL)

Para poder obtener esta relación mantenemos la velocidad y el voltaje de campo en valor cero, produciendo un tren de pulso unitario en la perturbación

(corriente de carga I_L), como se muestra en la figura 1.5.5.1.

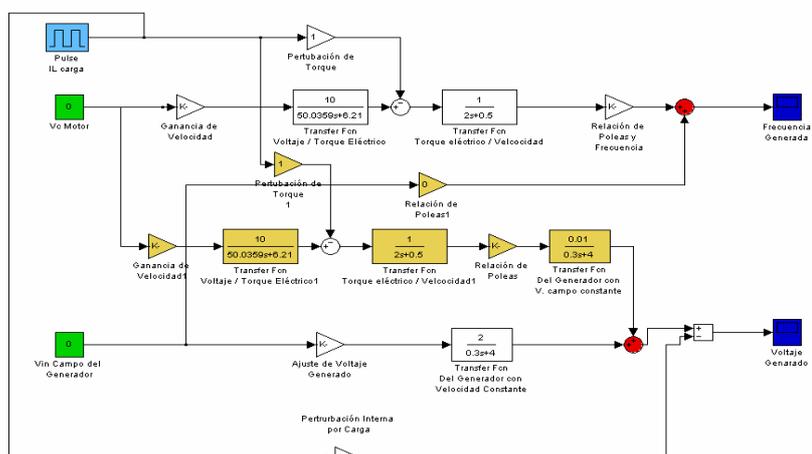


FIGURA 1.5.5.1 SISTEMA TEORICO VARIANDO PERTURBACION (I_L)

De este sistema obtenemos las siguiente gráfica 1.5.5.2.

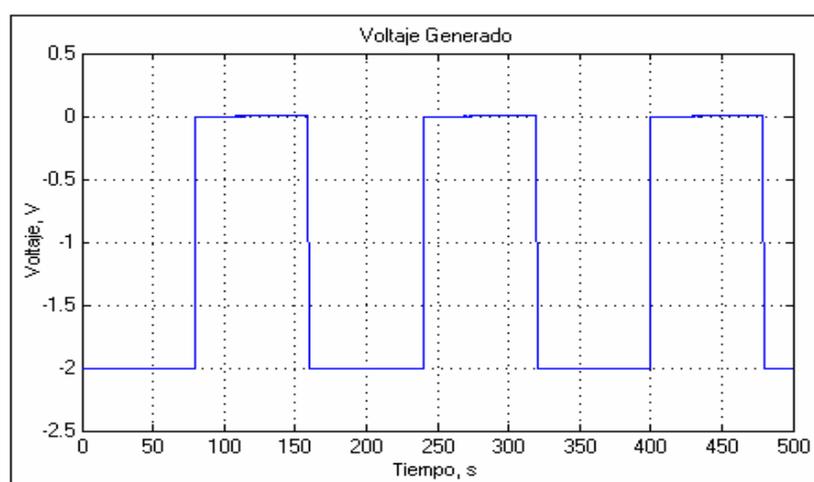


FIGURA 1.5.5.2 VOLTAJE GENERADO VARIANDO PERTURBACION

Lo que podemos concluir de esta gráfica es que la variable de voltaje generado es indirectamente proporcional a la perturbación (I_L), es decir que mientras mayor corriente de carga exista menor será el voltaje generado; esto es causa de que el voltaje generado en los bornes del generador (V_g) es igual al voltaje generado interno (E_a) menos la caída de potencia causado en la impedancia de salida del generador multiplicada por la corriente de carga ($I_L \cdot R_a$)

Esta curva tiene un tiempo de subida muy pequeño (0.2 s.), tanto que podemos decir que es instantánea la reacción de esta variable y un tiempo de estabilización igualmente muy rápida (0.2 s.), con una estabilidad perenne frente al tren de pulso de variaciones colocada.

Esto muestra que el aumento de la corriente de carga afecta considerablemente al voltaje generado en magnitudes elevadas, por lo tanto nuestro sistema deberá reaccionar de forma rápida para evitar que la perturbación de corriente afecte al voltaje generado considerablemente.

1.5.6 Frecuencia Generada variando Perturbación (IL)

Para poder obtener esta relación mantenemos la velocidad y el voltaje de campo en valor cero, produciendo un tren de pulso unitario en la perturbación (corriente de carga I_L), como se muestra en la figura 1.5.6.1:

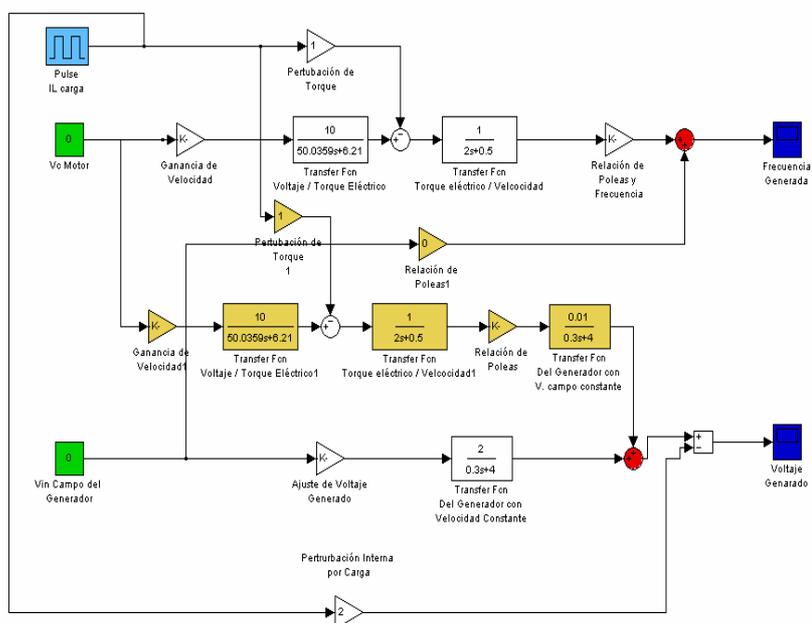


FIGURA 1.5.6.1 SISTEMA TEORICO VARIANDO PERTURBACION (IL)

De este sistema obtenemos las siguiente gráfica 1.5.6.2

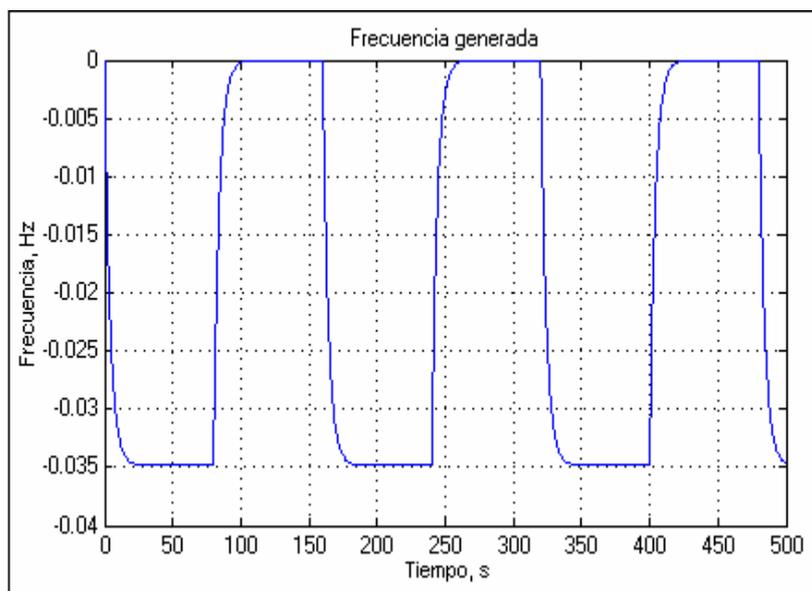


FIGURA 1.5.6.2 FRECUENCIA GENERADA VARIANDO
PERTURBACION

Lo que podemos concluir de esta grafica es que la variable de frecuencia generada es indirectamente proporcional a la perturbación (IL) al igual que el voltaje generado, es decir que mientras mayor corriente de carga exista menor será la frecuencia generada; esto es causado por la fuerza contra electromotriz producida en el generador por presencia de la corriente de carga, que genera un torque en sentido contrario a la fuerza motriz primaria (motor).

Esta curva tiene un tiempo de subida de (20 s.), y un tiempo de estabilización de (25 s.), con una estabilidad perenne frente al tren de pulso.

Lo que debemos observar es que la magnitud de la perturbación es muy pequeña, de valores alrededor de 0.035 (unidades). Por lo tanto la perturbación de la corriente de carga afecta más al voltaje generado que a la velocidad, la variable velocidad será afectada frente a perturbaciones de corrientes muy elevadas; que sí pueden ocurrir en el mercado eléctrico mayorista que manejan carga muy considerable como son las ciudades.

Dados estos análisis nos damos cuenta que la generación de voltaje y frecuencia son estables, variando cualquiera de las dos variables de control. Que la variable de velocidad del motor afecta tanto al voltaje generado como a la frecuencia generada, y que la variable de voltaje de campo del generador sólo afecta al voltaje generado de manera instantánea. La perturbación afecta indirectamente proporcional a la frecuencia generada y al

voltaje generado, siendo este último más afectado en magnitud y tiempo.

En el capítulo 2 realizaremos una modificación en la fuerza motriz (motor) utilizada e identificaremos en qué afecta esta modificación a las curvas obtenidas en este capítulo 1 teórico.

CAPITULO 2

2. SIMULACION DEL SISTEMA USANDO SIMULINK

En este capítulo se muestra la forma de modelar y simular un motor de inducción y un variador de frecuencia por medio del software MatLab, útil para determinar por simulación la respuesta dinámica del sistema.

Se va a determinar el comportamiento del sistema del motor y del generador por medio de las gráficas de curvas de trabajo para cada modelo por medio de Simulink.

2.1. Sistema a controlar

2.1.1. Simulación del sistema manteniendo constante el voltaje de campo (V_f) y variando el voltaje de control del variador (V_c)

El modelo de la planta simulada por bloques de Simulink a lazo abierto se presenta en la figura 2.1.1.1; el motor de inducción es simulado utilizando el bloque Máquina

Asincrónica de la librería de Simulink. Las especificaciones del motor que se va a simular son: 0.5 HP, 220V, 2 polos, 60 Hz. Teniendo los siguientes parámetros, los cuales son datos reales del motor que se está utilizando: $R_s=0.087 \Omega$, $L_s= 0.8 \text{ mH}$, $L_m = 34.7 \text{ mH}$, $R_r=0.228 \Omega$, $L_r = 0.8 \text{ mH}$.

Este modelo ya se encuentra realizado en Simulink, en la librería de Demo de Powerlib con el nombre de **psbpwm**, en el libro "Power System Blockset" (1) se especifica con detalle el funcionamiento del modelo, el cual ha sido modificado de acuerdo a nuestra necesidad. Se escogió este modelo debido a que se acerca mucho al sistema real ya que se encuentra modelado también el variador de frecuencia. Al igual que éste hay muchos modelos que pueden servir de ayuda al momento de realizar una simulación.

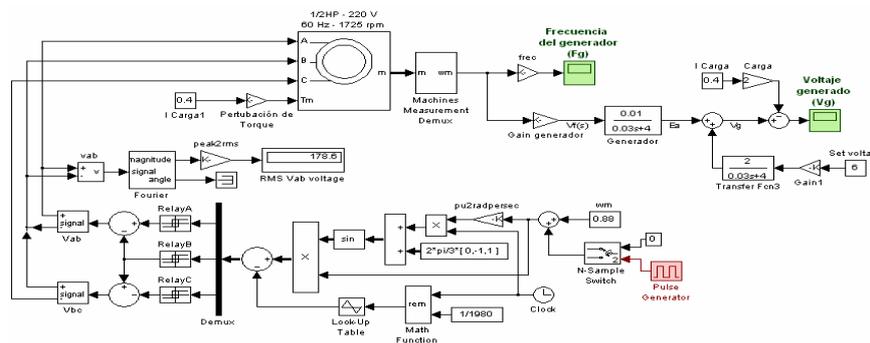


FIGURA 2.1.1.1 MODELO DEL SISTEMA A LAZO ABIERTO VARIANDO V_c

Para la simulación del sistema se va a variar la velocidad del motor por medio del bloque Generador de Pulso cuya amplitud de es de 0.1, lo cual ocasiona que aumente la frecuencia del generador de 26 a 30 Hz., se mantiene constante el voltaje del generador a 6 V y las corrientes de carga a 0.4 A, los cuales son datos con los que se va a trabajar con la planta. En la gráfica 2.1.1.2 se muestra las variaciones de las variables a controlar: voltaje generado (V_g) y frecuencia del generador (F_g).

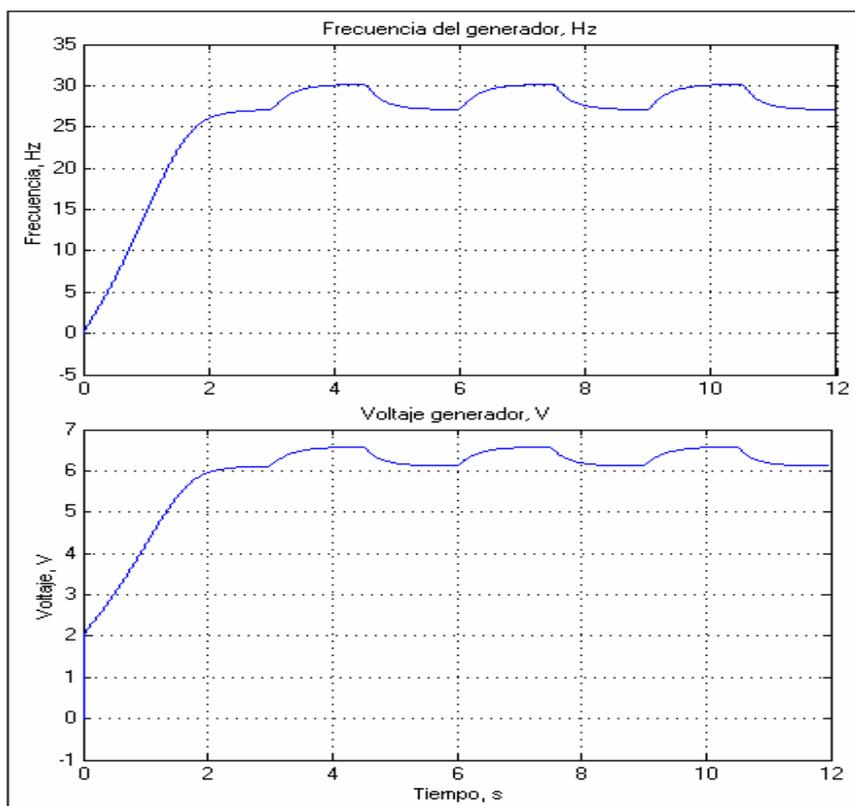


FIGURA 2.1.1.2 VOLTAJE GENERADO (V_g), FRECUENCIA DEL GENERADOR (F_g)

Como se puede observar en la figura 2.1.1.2 la variación que se produce en la velocidad del motor debido a que se aumenta el voltaje de control del variador (V_c) aumenta la frecuencia del generador y a causa de ello también aumenta el voltaje generador por lo que se dice que existe una interrelación entre V_c y V_g .

2.1.2. Simulación del sistema manteniendo constante el voltaje de control del variador (V_c) y variando el voltaje de campo (V_f)

Para variar V_f se utiliza el bloque Generador de Pulsos, el cual permite variar el voltaje de 6 a 7 V. En la figura 2.1.2.1 se muestra la simulación a realizar.

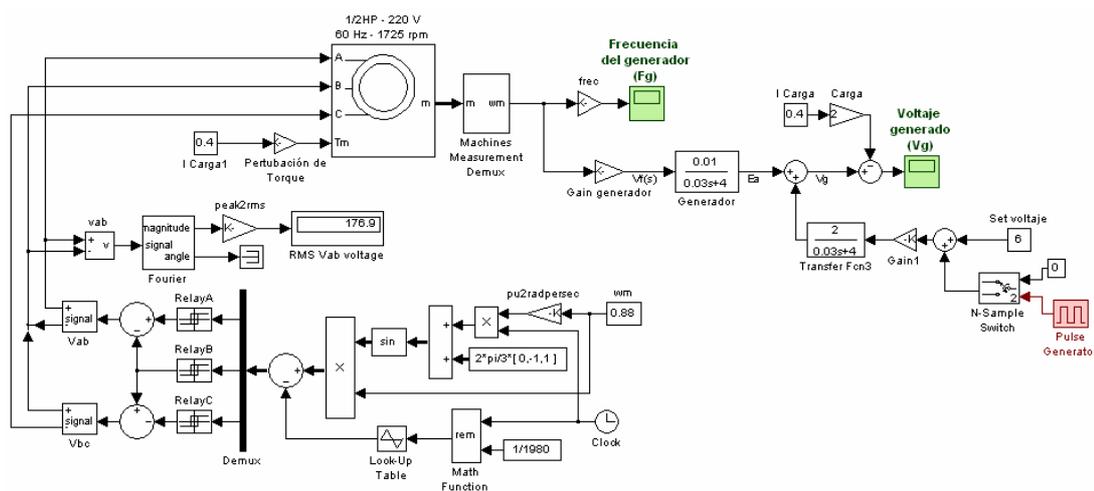


FIGURA 2.1.2.1 SIMULACION DEL SISTEMA VARIANDO V_f

En la figura 2.1.2.2. se muestra las curvas de F_g y V_g , como se puede observar al variar V_f solo afecta el voltaje generado (V_g) y no a la frecuencia del generador (F_g) por lo que no hay una interrelación entre V_c y F_g .

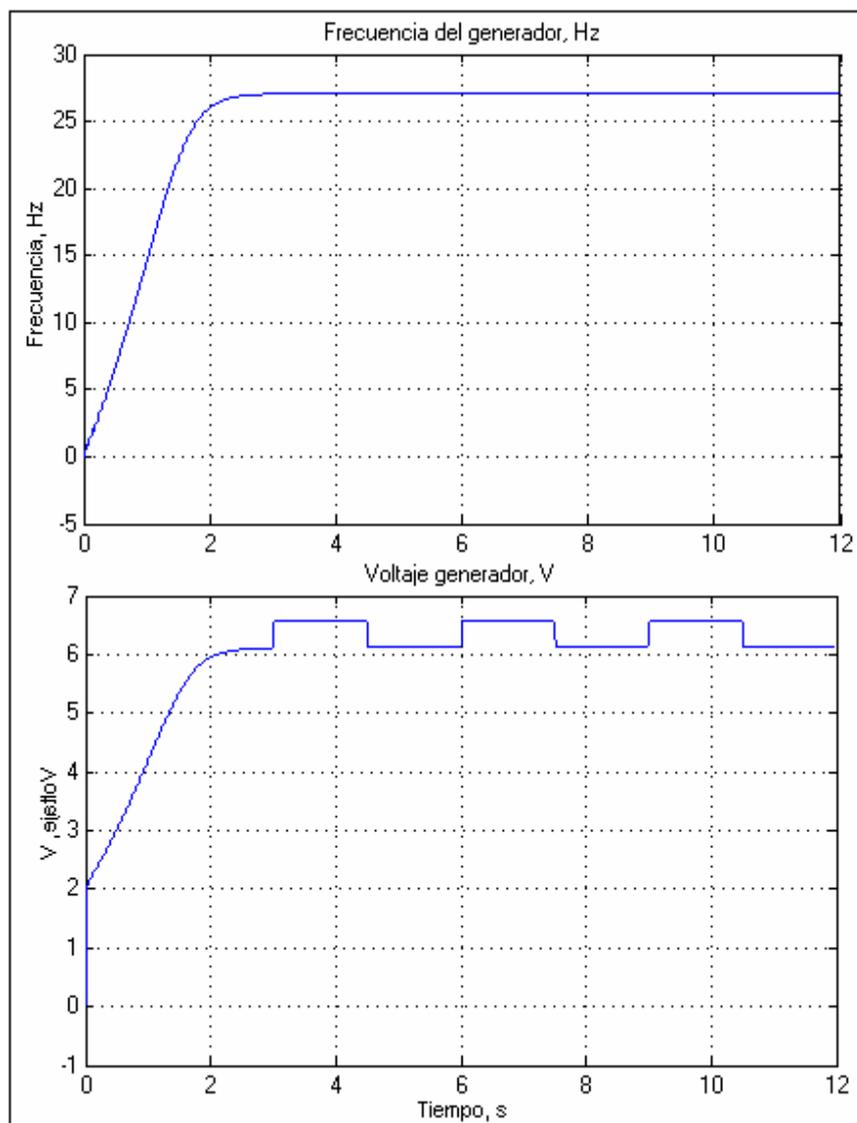


FIGURA 2.1.2.2 CURVAS DE F_g y V_g , VARIANDO V_f

2.1.3. Simulación del sistema manteniendo constante el voltaje de control del variador (V_c), el voltaje de campo (V_f) y variando la corriente de carga

Para simular la variación de carga se lo realiza por medio de la corriente de carga. El aumento de corriente se la simula por medio del bloque Generador de Pulsos, el cual hay un aumento de 0.4 a 0.8 A. En la figura 2.1.3.1 se muestra la simulación a realizar.

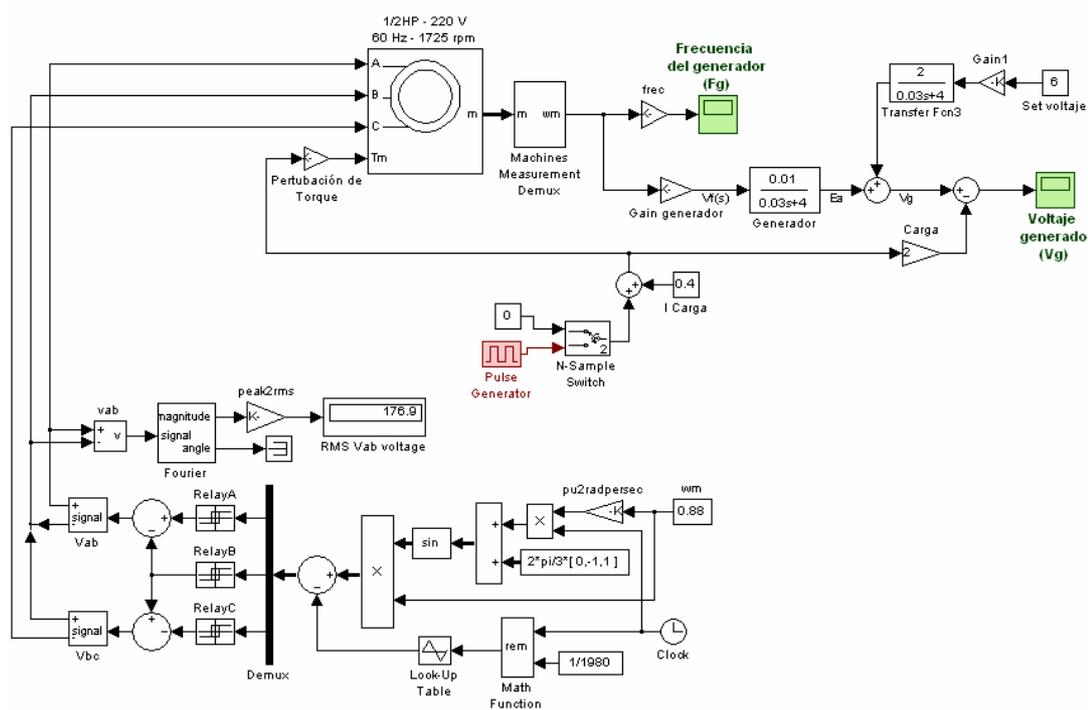


FIGURA 2.1.3.1 MODELO A LAZO ABIERTO VARIANDO I_{carga}

Como se puede observar en la figura 2.1.3.2, al aumentar la corriente hay una caída en el voltaje generado mientras que en la frecuencia no se observa variación debido a que la corriente es pequeña para frenar al motor, pero a mayor corriente produce un freno en el motor.

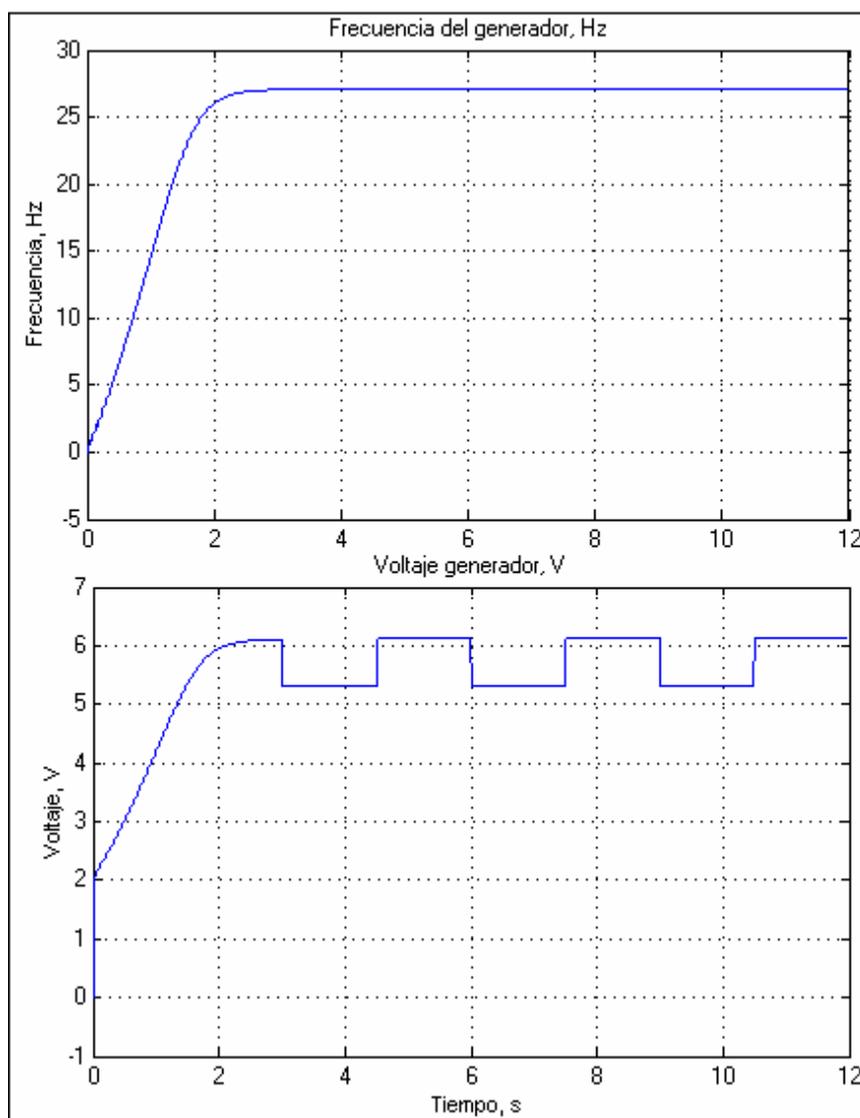


FIGURA 2.1.3.2 CURVAS DE F_g Y V_g , VARIANDO I carga

Al comparar los gráficos obtenidos por medio de la simulación con bloques de Simulink con los gráficos del capítulo 1 por medio del modelo matemático del sistema llegamos a la conclusión de que el modelo matemático da una idea de cómo afecta los cambios en las variable manipuladas a las variables controladas de manera cualitativa.

En este capítulo 2 se simula al motor trifásico y por medio de los gráficos de las simulaciones muestra que las relaciones entre las variables manipuladas y las variables controladas se mantienen, por lo que al usar el modelo matemático de un motor DC no afecta a las relaciones entre las variables manipuladas y controladas. Esta simulación se acerca de manera más precisa a las curvas de las variables de la planta real.

CAPITULO 3

3. PRUEBA DE CAMPO

3.1 Pruebas de Equipos, adquisición de datos y curvas características

Antes de poder realizar las pruebas de circuito completo debemos conocer perfectamente los parámetros de cada equipo por individual, así como su curva de trabajo. A continuación realizaremos una reseña de los datos de placa de cada equipo comprado para realizar la maqueta, así como sus curvas de trabajo obtenidas en datos experimentales.

3.1.1 Motor

- Datos de Placa (figura 3.1.1.1)

Potencia	0.5 Hp
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	220 VAC YY - 440 Y TRIFÁSICO

Corriente	1.9 - 0.95
Velocidad	1590 rpm
Factor de Servicio	1.15
Factor de Potencia	0.81
Clase de Aislamiento	F
IP	55
Peso	4.7 Kg
De trabajo constante	Clase de motor "A"

FIGURA 3.1.1.1 DATOS DE PLACA DEL MOTOR TRIFASICO

- Circuito equivalente teórico (figura 3.1.1.2)

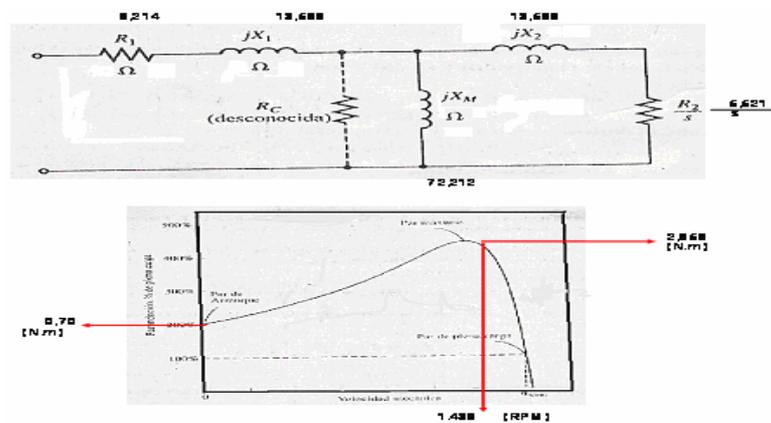


FIGURA 3.1.1.2 CIRCUITO EQUIVALENTE TEORICO DE UN MOTOR DC

3.1.1.1 Curvas de trabajo

3.1.1.1.1 Frecuencia vs RPM del motor

Donde el eje de las X = frecuencia de entrada al motor trifásico y el eje de las Y = RPM del motor, figura 3.1.1.1.1.

- Ecuación: $y=a+bx$
- Coeficientes:
 $a = -1.0516535$
 $b = 28.919967$
- Error estándar: 35.7954931
- Coeficiente de correlación: 0.9984439

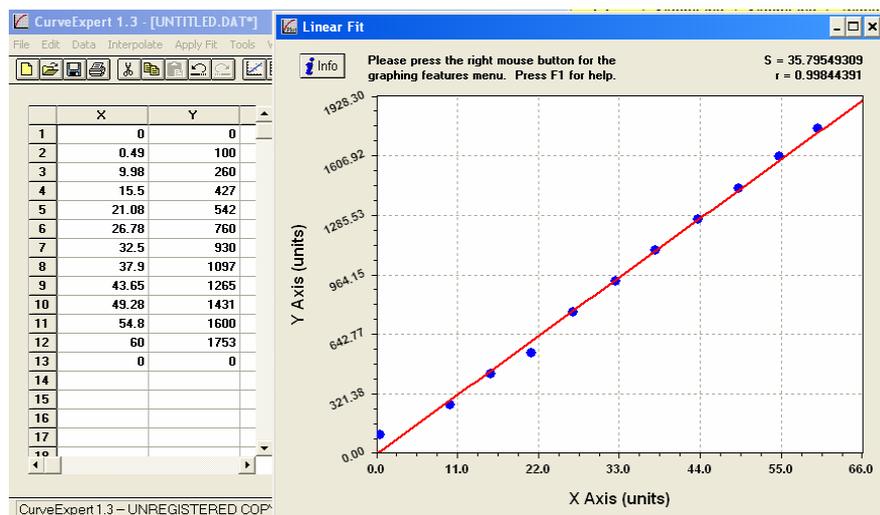


FIGURA 3.1.1.1.1.1 FRECUENCIA vs RPM DEL MOTOR

3.1.1.1.2 I armadura vs RPM

La corriente de armadura es constante, es decir, no depende de la variación de frecuencia que sufre el motor, depende directamente del nivel de voltaje que se conecte al devanado del campo del motor, (figura 3.1.1.1.2.1).

- $I_{\text{Armadura}} = 1.5 \text{ Amps. AC.}$

Donde el eje de las X = RPM del Motor y el eje de las Y = $I_{\text{Armadura AC}}$

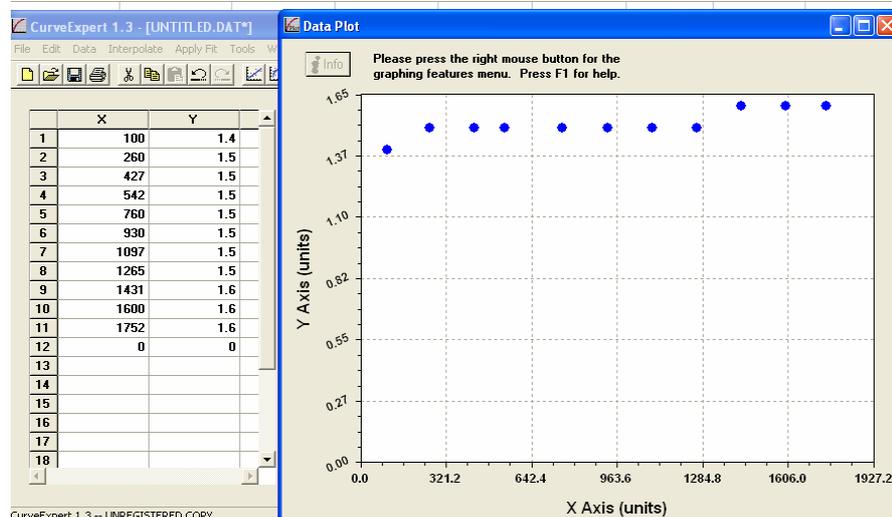


FIGURA 3.1.1.1.2.1 I ARMADURA vs RPM

3.1.2 Alternador

- Datos de Placa (figura 3.1.2.1)

Máxima potencia de salida	537 W
Máxima corriente salida a full carga	43 Amps
Mínima velocidad del rotor	1270 rpm
Máxima corriente de Campo	3,2 Amps
Corriente de dispersión a 12 volts	0,2 mApms
Máxima cresta de voltaje de salida	0,26 V

FIGURA 3.1.2.1 DATOS DE PLACA DEL ALTERNADOR

- Circuito equivalente teórico (figura 3.1.2.2)

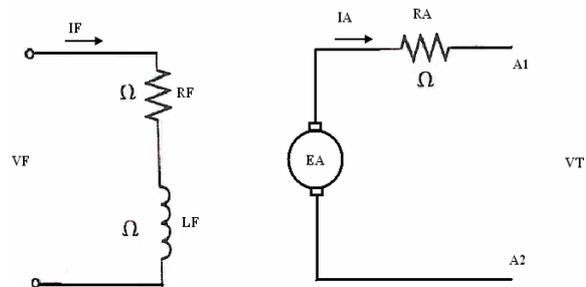


FIGURA 3.1.2.2. CIRCUITO EQUIVALENTE TEORICO DEL GENERADOR

3.1.2.1 Curvas de trabajo

3.1.2.1.1 RPM del motor vs RPM del alternador

Donde el eje de las X = RPM del motor y el eje de las Y = RPM del generador, figura 3.1.2.1.1.1

- Ecuación: $y=a+bx$

- Coeficientes:

$$a = 5.4929419$$

$$b = 1.0362644$$

- Error estándar: 15.1408839
- Coeficiente de correlación: 0.9997409

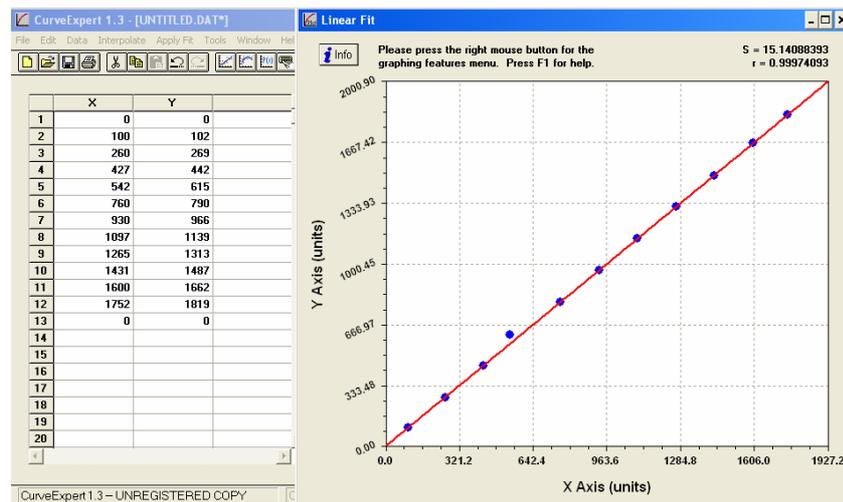


FIGURA 3.1.2.1.1.1 RPM del motor vs RPM del alternador

3.1.2.1.2 Voltaje Generado vs RPM del Generador (voltaje de campo constante a 1.5 VDC)

Donde el eje de las X = RPM del Generador y el eje de las Y = Voltaje Generado VDC, figura 3.1.2.1.2.1.

- Ecuación: $y=a+bx$
- Coeficiente:
 - $a = -0.95247269$
 - $b = 0.0041798895$
- Error estándar: 0.4199281
- Coeficiente de correlación: 0.9871992

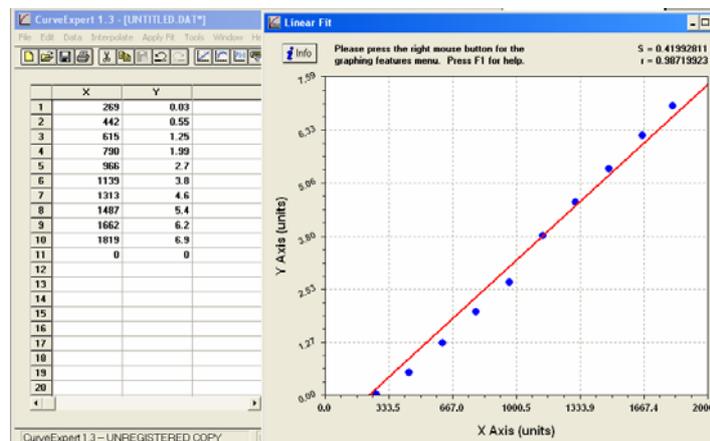


FIGURA 3.1.2.1.2.1. VOLTAJE GENERADO VS RPM DEL GENERADOR

3.1.2.1.3 Voltaje Generado vs Voltaje de Campo (RPM del Generador constante 1819 RPM)

Donde el eje de las X = Voltaje de Campo VDC y el eje de las Y = Voltaje Generado VDC, figura 3.1.2.1.3.1.

- Ecuación: $y = \frac{a \cdot b + c \cdot x^d}{b + x^d}$
- Coeficientes:
 - a = -0.14550916
 - b = 2.821684
 - c = 15.432573
 - d = 2.0282453
- Error estándar: 0.1526150
- Coeficiente de correlación: 0.9994295

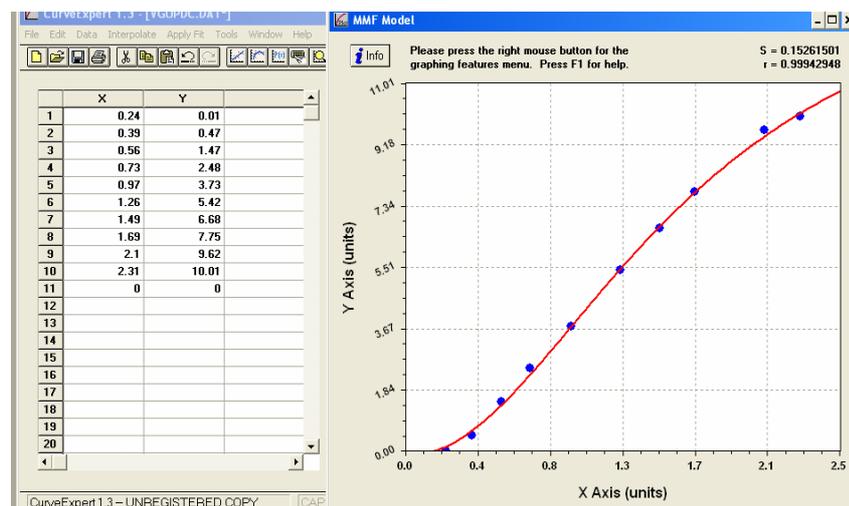


FIGURA 3.1.2.1.3.1 VOLTAJE GENERADO VS VOLTAJE DE CAMPO

3.1.2.1.4 Frecuencia Generada vs RPM del Generador

Donde el eje de las X = RPM del Generador y el eje de las Y = Frecuencia Generada Hz, figura 3.1.2.1.4.1.

- Ecuación: $y=a+b*x$
- Coeficientes:
a = 0.022653191
b = 0.016732866
- Error estándar: 0.2853527
- Coeficiente de correlación: 0.9996753

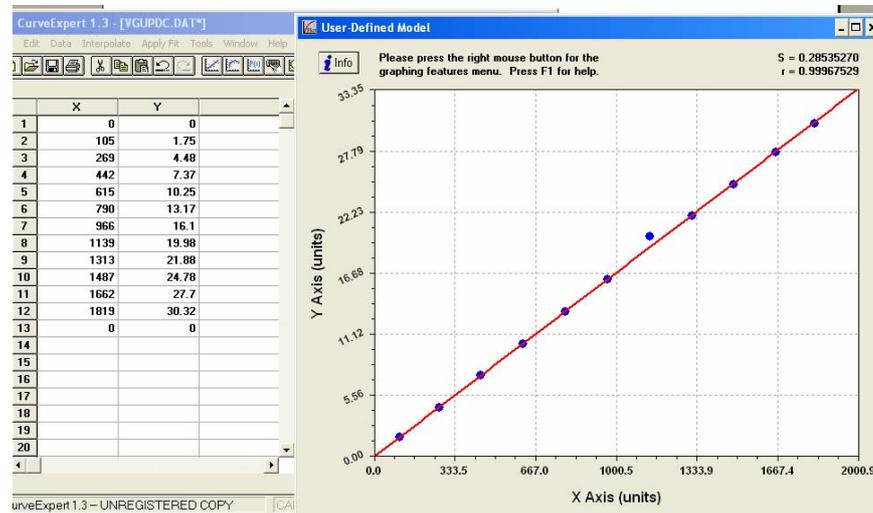


FIGURA 3.1.2.1.4.1 FRECUENCIA GENERADA VS RPM DEL GENERADOR

3.1.2.1.5 I Generado vs RPM del Generador

Donde el eje de las X = RPM del Generador y el eje de las Y = I generado, figura 3.1.2.1.5.1.

- Ecuación: $y = a + bx + cx^2$
- Coeficientes:
 - a = -0.4744323
 - b = 0.01584855
 - c = -1.4390537e-06
- Error estándar: 1.6150308

- Coeficiente de correlación: 0.9963844

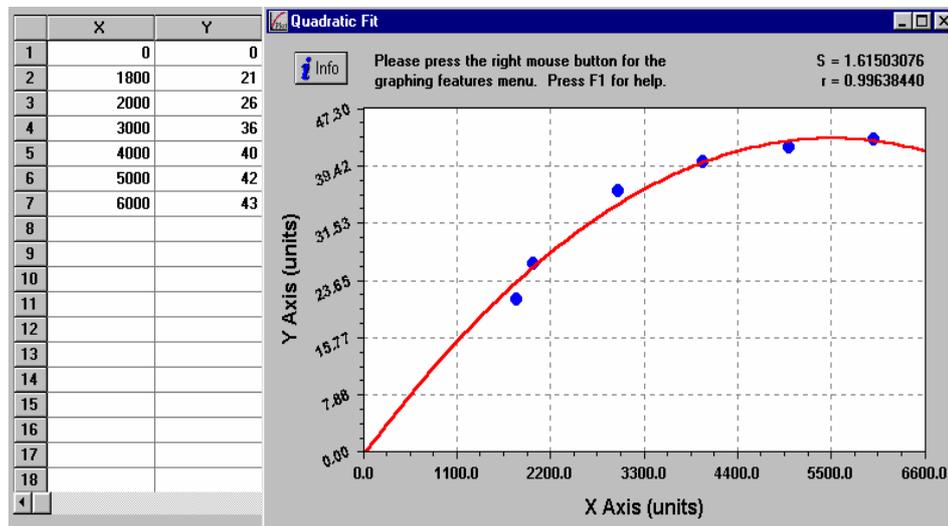


FIGURA 3.1.2.1.5.1 | GENERADO VS RPM DEL GENERADOR

3.1.3 Tacómetro

- Datos de Placa (figura 3.1.3.1)

Voltaje / RPM	40 mV / RPM
Potencia	0.5 HP

FIGURA 3.1.3.1 DATOS DE PLACA DEL TACOMETRO

- Circuito equivalente teórico (figura 3.1.3.2).

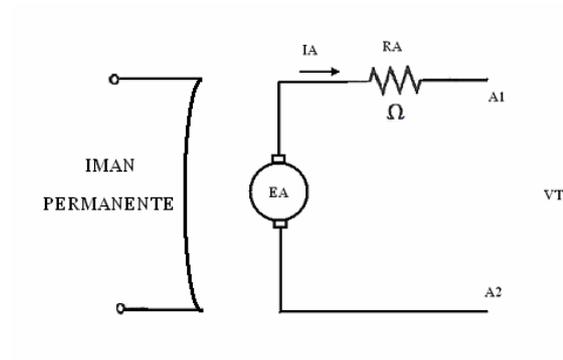


FIGURA 3.1.3.2. CIRCUITO EQUIVALENTE TEORICO DEL TACOMETRO

3.1.3.1 Curvas de trabajo

3.1.3.1.1 RPM del motor vs RPM del tacómetro

Donde el eje de las X = RPM del motor y el eje de las Y = RPM del Tacómetro, figura 3.1.3.1.1.1.

- Ecuación: $y=a+bx$
- Coeficientes:
 - a = 2.581122
 - b = 0.55048656
- Error estándar: 7.9779710

- Coeficiente de correlación: 0.9997451

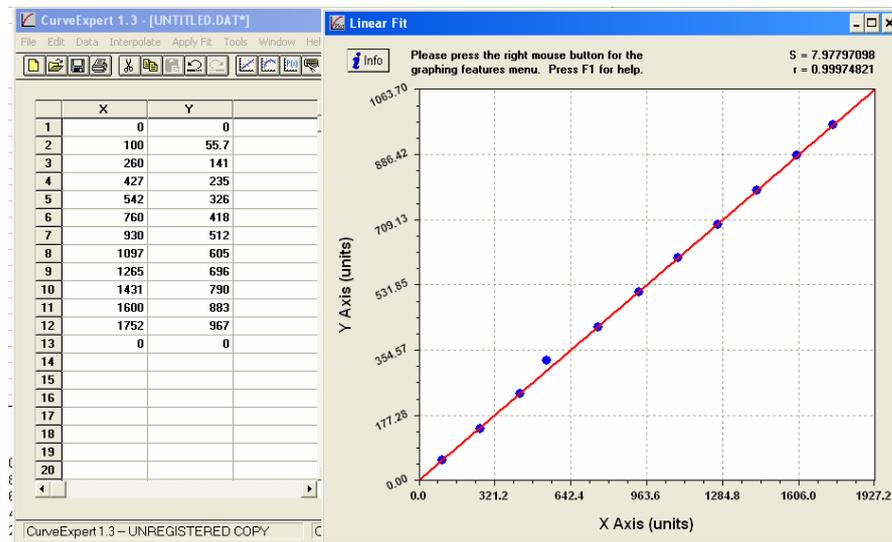


FIGURA 3.1.3.1.1.1 RPM DEL MOTOR VS RPM DEL TACÓMETRO

3.1.3.1.2 Voltaje Generado vs RPM del tacómetro (voltaje de campo constante)

Donde el eje de las X = RPM del tacómetro y el eje de las Y = Voltaje Generado del Tacómetro, figura 3.1.3.1.2.1

- Ecuación: $y=a+bx$

- Coeficientes:

$$a = -0.048489223$$

$$b = 0.040169197$$

- Error estándar: 0.0780129
- Coeficiente de correlación: 0.9999849

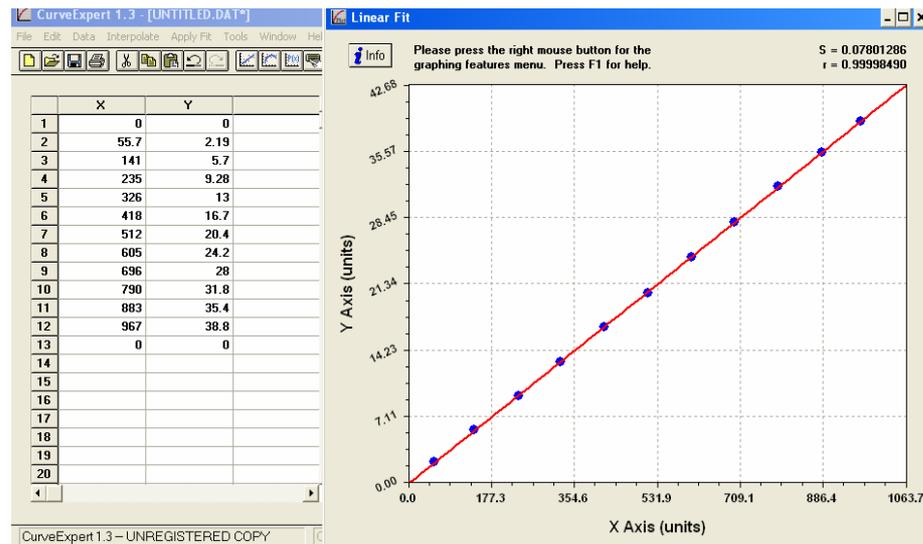


FIGURA 3.1.3.1.2.1 VOLTAJE GENERADO VS RPM DEL TACÓMETRO

3.1.4 Variador de frecuencia

- Datos de Placa

Voltaje Entrada	200 - 240 VAC
Potencia	0.37 Kw
Frecuencia de entrada	47 - 63 HZ
Corriente de Entrada	5.5 – 24 Amps

Fases de entrada	1 – 3 Fases
Voltaje de Salida	0 – Voltaje de Entrada Vac
Frecuencia de Salida	0 – 650 Hz
Fases de Salida	3 fases
IP	20
Marca	SIEMENS

3.1.4.1 DATOS DE PLACA DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

- Circuito equivalente teórico

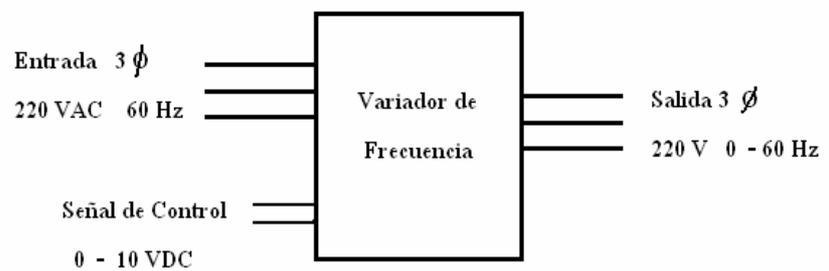


FIGURA 3.1.4.2 CIRCUITO EQUIVALENTE TEÓRICO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

3.1.4.1 Curvas de trabajo

3.1.4.1.1 Voltaje de Control vs Frecuencia de salida

Donde el eje de las X = Voltaje de Control y el eje de las Y = Frecuencia de Salida del Variador de Frecuencia, figura 3.1.4.1.1.1.

- Ecuación: $y=a+bx$
- Coeficientes:
a = -1.4206931
b = 11.225122
- Error estándar: 1.2804513
- Coeficiente de correlación: 0.9983294

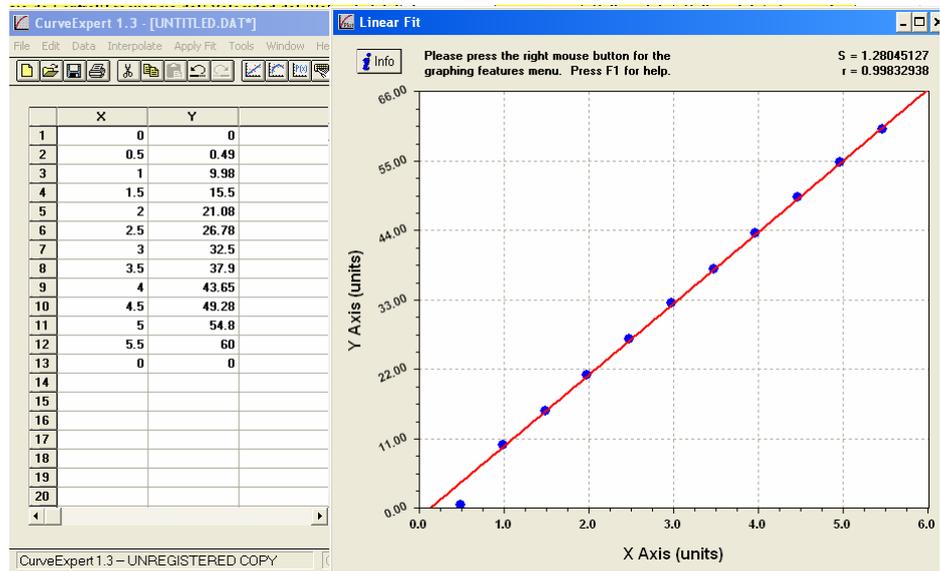


FIGURA 3.1.4.1.1.1 VOLTAJE DE CONTROL VS FRECUENCIA DE SALIDA

3.1.5 Carga (Focos)

- Datos de Placa (Son tres cargas idénticas), figura 3.1.5.1

Voltaje	12 VDC
Potencia	3.6 W
Corriente Máxima	0.3 Amps.

FIGURA 3.1.5.1 DATOS DE PLACA DE LA CARGA

- Circuito equivalente teórico (figura 3.1.5.2).

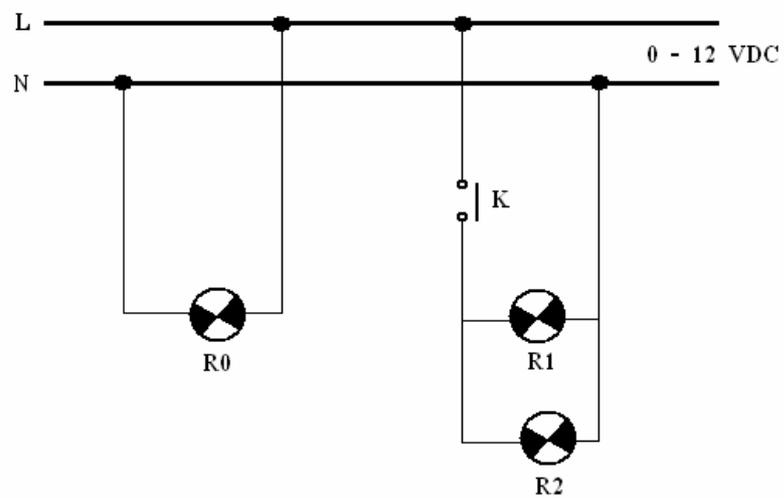


FIGURA 3.1.5.2 CIRCUITO EQUIVALENTE TEORICO DE LA CARGA

3.1.5.1 Curvas de trabajo

3.1.5.1.1 Curva de Corriente vs Voltaje

Donde el eje de las X = Voltaje Generado y el eje de las Y = Corriente de la carga (sólo una), figura 3.1.5.1.1.1.

- Ecuación: $y=a+bx$

- Coeficientes:

$$a = -0.00093441643$$

$$b = 0.027336197$$

- Error estándar: 0.0038810
- Coeficiente de correlación: 0.9993516

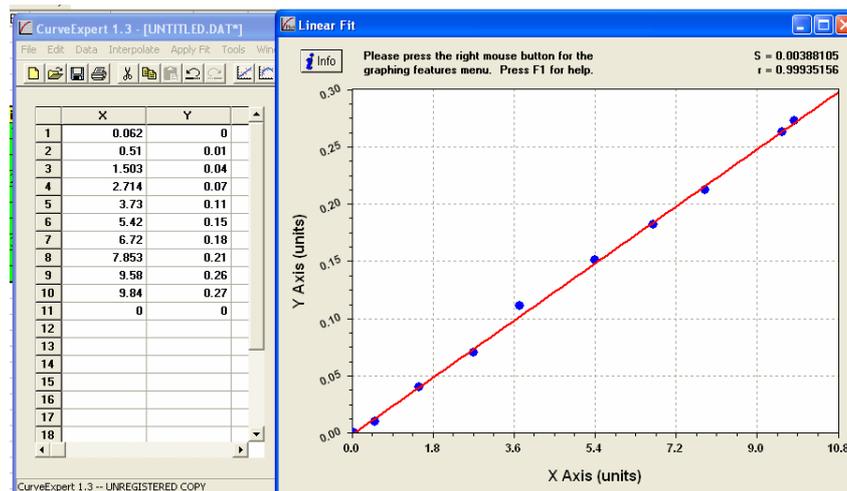


FIGURA 3.1.5.1.1.1 CURVA DE I VS VOLTAJE

Donde el eje de las X = Voltaje Generado y el eje de las Y = Corriente de la carga (tres cargas), figura 3.1.5.1.1.2

- Ecuación: $y=a+bx$
- Coeficientes:
 - a = 0.0020849978
 - b = 0.081304035
- Error estándar: 0.0055926
- Coeficiente de correlación: 0.9998477

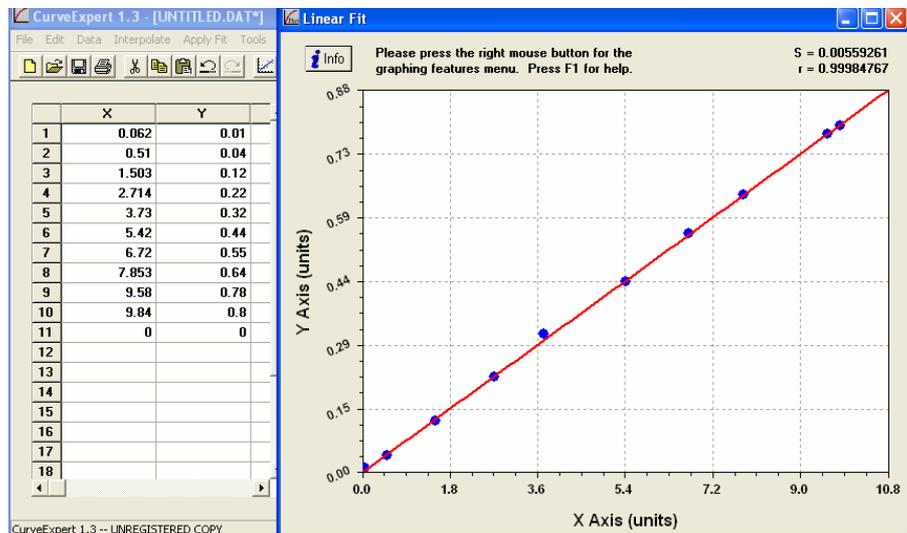


FIGURA 3.1.5.1.1.2 CURVA DE I VS VOLTAJE

3.1.6 Sistema de control

El programa de Simulink envía una señal de control hacia los circuitos electrónicos de adecuación de señal; estos circuitos también adecuan las señales de ingreso al computador evitando posibles daños a la tarjeta de comunicación. Los circuitos son cuatro:

1. Salida de control del variador de frecuencia
2. Salida de control del voltaje de campo
3. Entrada de voltaje del tacómetro

4. Entrada de voltaje generado

Los circuitos electrónicos y datos técnicos de los elementos utilizados se encuentra en el anexo E; aquí documentaremos sus curvas de trabajos, para obtener las relaciones.

3.1.6.1 Curvas de trabajo

3.1.6.1.1 Salida de control del variador de frecuencia vs Voltaje de control del variador de frecuencia

Donde el eje de las X = Salida de control del variador de frecuencia del computador y el eje de las Y = Voltaje de control del variador de frecuencia, figura 3.1.6.1.1.1.

- Ecuación: $y=a+bx$
- Coeficientes:
a = 0
b = 1

- Error estándar: 0.0000000
- Coeficiente de correlación: 1.0000000

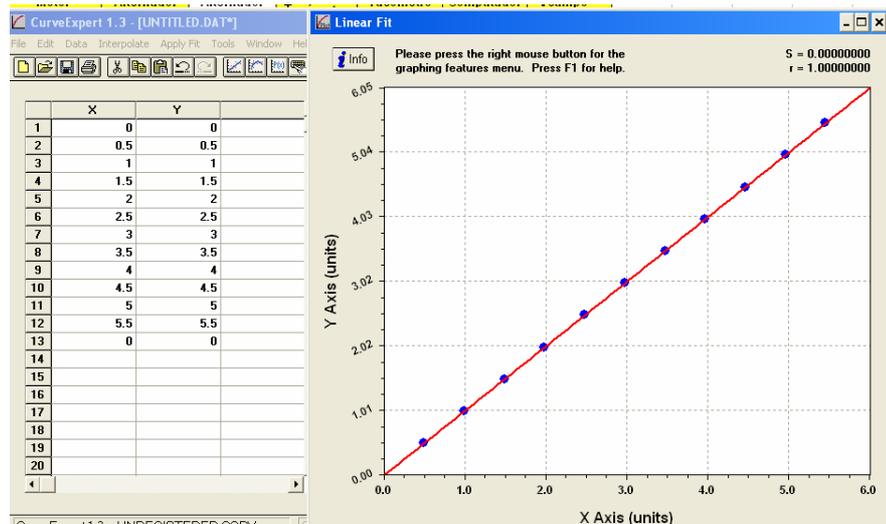


FIGURA 3.1.6.1.1.1 SALIDA DE CONTROL DEL VARIADOR DE FRECUENCIA VS VOLTAJE DE CONTROL DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

3.1.6.1.2 Salida de control del voltaje de campo vs voltaje de campo del generador

Donde el eje de las X = Salida de control del voltaje de campo del computador y el eje de

las Y = voltaje de campo del generador, figura 3.1.6.1.2.1.

- Ecuación: $y = a + bx + cx^2 + dx^3$
- Coeficientes:
 - a = 0.00049568011
 - b = -0.58249225
 - c = 0.48902698
 - d = -0.052786412
- Error estándar: 0.0250432
- Coeficiente de correlación: 0.9996383

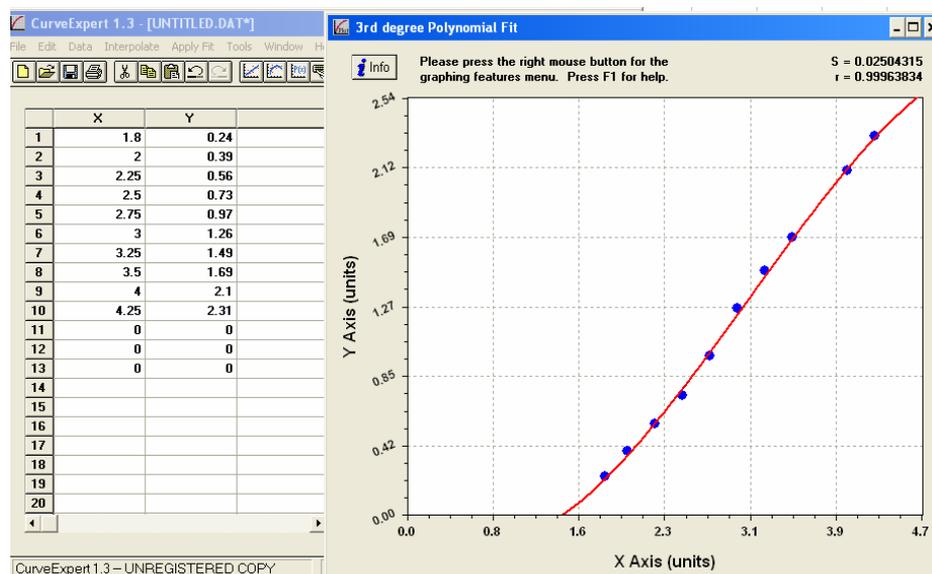


FIGURA 3.1.6.1.2.1 SALIDA DE CONTROL DEL VOLTAJE DE CAMPO VS VOLTAJE DE CAMPO DEL GENERADOR

3.1.6.1.3 Voltaje del tacómetro vs entrada de voltaje del tacómetro al computador

Donde el eje de las X = Voltaje del tacómetro y el eje de las Y = entrada de voltaje del tacómetro al computador, figura 3.1.6.1.3.1.

- Ecuación: $y=a+bx$
- Coeficientes:
 - a = 0.077986391
 - b = 0.26862189
- Error estándar: 0.1845503
- Coeficiente de correlación : 0.9988308

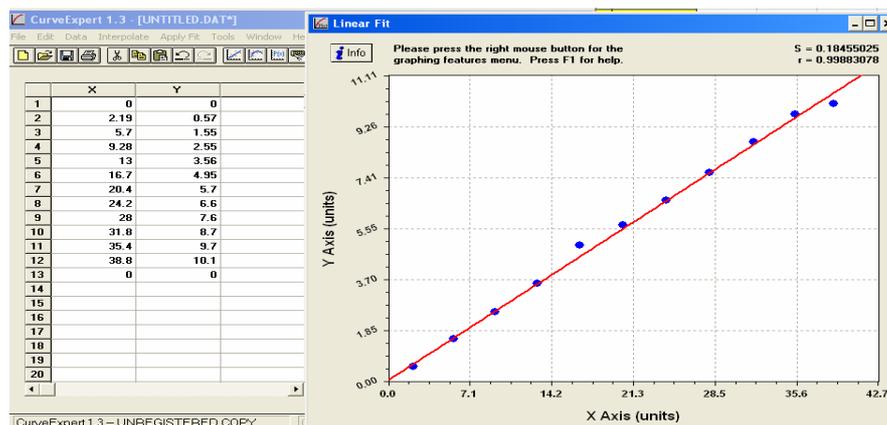


FIGURA 3.1.6.1.3.1 VOLTAJE DEL TACOMETRO VS ENTRADA DE VOLTAJE DEL TACÓMETRO AL COMPUTADOR

3.1.6.1.4 Voltaje generado en el generador vs entrada de voltaje generado al computador

Donde el eje de las X = Voltaje generado en el generador y el eje de las Y = entrada de voltaje generado al computador, figura 3.1.6.1.4.1.

- Ecuación: $y=a+bx$
- Coeficientes:
 - a = 0
 - b = 1
- Error estándar: 0.0000000
- Coeficiente de correlación: 1.0000000

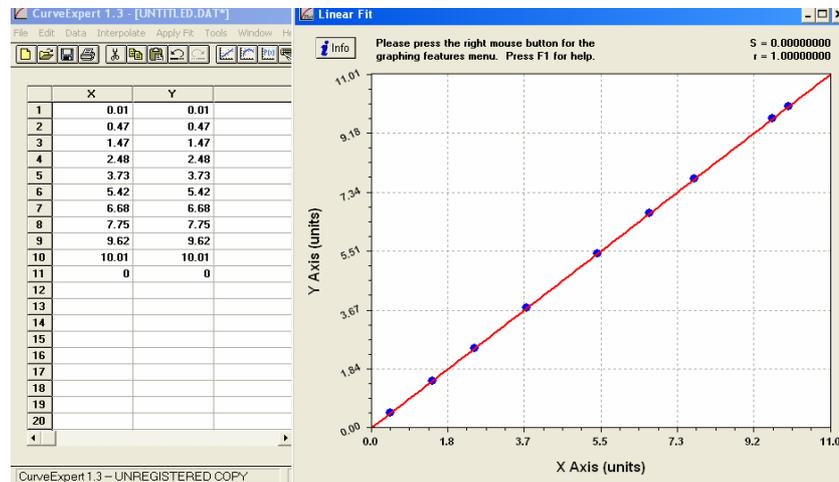


FIGURA 3.1.6.1.4.1 VOLTAJE GENERADO EN EL GENERADOR VS ENTRADA DE VOLTAJE GENERADO AL COMPUTADOR

3.1.6.1.5 Voltaje generado en el generador vs Variable de control de voltaje

Donde el eje de las X = Voltaje generado en el generador y el eje de las Y = variable de control de voltaje, figura 3.1.6.1.5.1.

- Ecuación: $y = \frac{a+bx}{1+cx+dx^2}$

- Coeficientes:

$$a = 0.00069030238$$

$$b = 160.56926$$

$$c = 74.564845$$

$$d = -3.6750944$$

- Error estándar: 0.0805512
- Coeficiente de correlación: 0.9983702

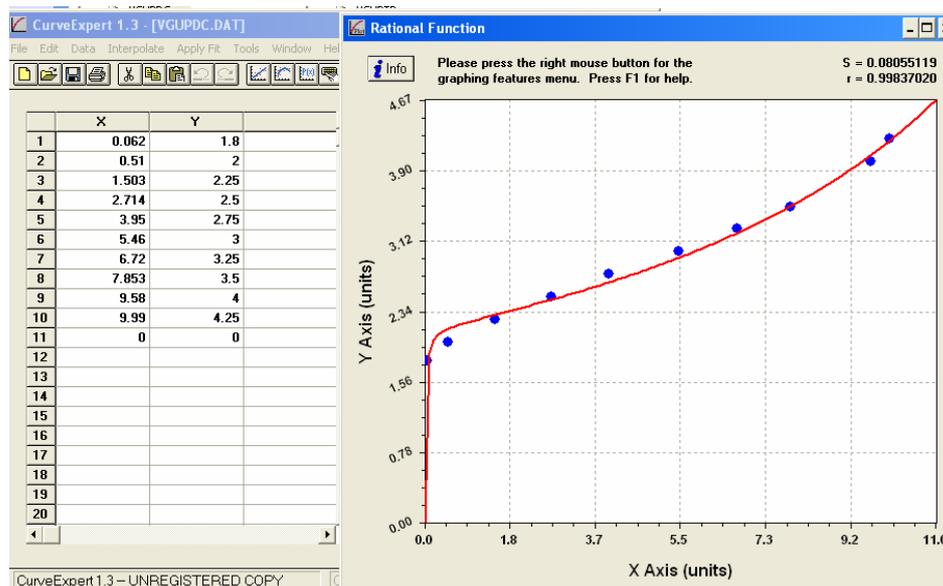


FIGURA 3.1.6.1.5.1 VOLTAJE GENERADO EN EL GENERADOR VS VARIABLE DE CONTROL DE VOLTAJE

3.1.6.1.6 Frecuencia generada en el generador vs Variable de control de frecuencia

Donde el eje de las X = Voltaje generado en el generador y el eje de las Y = variable de control de voltaje, figura 3.1.6.1.6.1.

- Ecuación $y=a+bx$
- Coeficientes:
a = 0.12141508
b = 0.17774411
- Error estándar: 0.0696633
- Coeficiente de correlación: 0.9993836

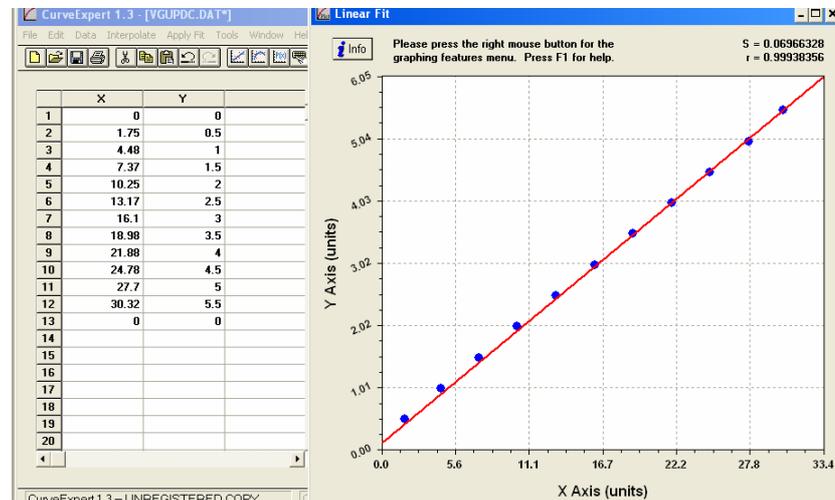


FIGURA 3.1.6.1.6.1 FRECUENCIA GENERADA EN EL GENERADOR VS VARIABLE DE CONTROL DE FRECUENCIA

Las relaciones que se va a utilizar en la creación de nuestro sistema son las siguientes:

- **Frecuencia vs voltaje generado (Ganancia F_r / V_g):**
 - Voltaje generado = $0.004179 \cdot \text{Velocidad generador}$
 - Velocidad generador = $60 \cdot \text{frecuencia}$
 - Voltaje generado = $0.251 \cdot \text{frecuencia}$

Por lo tanto: **Ganancia Fr / Vg = 0.251**

- **Voltaje generado vs Frecuencia**

(Ganancia Vg / Fr):

- Voltaje generado = $1/0.004179 * \text{Velocidad generador}$
- Velocidad generador = $1 / 60 * \text{frecuencia}$
- Frecuencia = $3.97 * \text{Voltaje generado}$

Por lo tanto: **Ganancia Vg / Fr = 3.97**

- **Voltaje Generado vs Variable de control**

(Fcn Vg / Vc):

Esta relación es una función:

- **Fcn Vg / Vc = $(0.00069 + 160.569x) / (1 + 74.564x - 3.6751x^2)$**

- **Frecuencia Generada vs Variable de control (Ganancia Fr / Vc):**

Esta ganancia la hemos obtenido directo:

- **Ganancia $F_r / V_c = 1.777$**

Nota: Las tablas con todos los datos donde hemos podido obtener estas relaciones se encuentra en el anexo H para más información.

3.2 Adquisición de datos utilizando XPCTarget

La tarjeta de adquisición de datos que se utiliza para la adquisición de datos es de la National Instrument serie PCI-6024E. Tiene 68 pines de los cuales con 16 canales de entrada analógicos, 2 salidas analógicas, 8 canales digitales entrada/salida, contadores, etc. En la figura 3.2.1.1 se muestra una figura de la tarjeta. Los canales analógicos trabajan con voltajes desde -10V a +10V, los canales digitales con voltajes de -5V y +5V; la corriente de salida de la tarjeta es de 65 mA máximo, por lo que para nuestra planta se usa una etapa amplificadora de corriente.



FIGURA 3.2.1 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PCI

Se seleccionó esta tarjeta debido a que cumplen los requisitos a nivel didáctico, ya que no es necesario una tarjeta con mayor capacidad ni mayor potencia, por lo que se adquirió esta tarjeta de la National Instrument que soporta voltaje de hasta 10V y corrientes no mayores a 65 mA. La descripción de los pines se muestra detalladamente en la figura 3.2.2.

AI 8	34	68	AI 0
AI 1	33	67	AI GND
AI GND	32	66	AI 9
AI 10	31	65	AI 2
AI 3	30	64	AI GND
AI GND	29	63	AI 11
AI 4	28	62	AI SENSE
AI GND	27	61	AI 12
ACH13	26	60	AI 5
ACH6	25	59	AI GND
AI GND	24	58	AI 14
ACH15	23	57	AI 7
AO 0 ¹	22	56	AI GND
AO 1 ¹	21	55	AO GND
EXT REF ¹	20	54	AO GND
P0.4	19	53	D GND
D GND	18	52	P0.0
P0.1	17	51	P0.5
P0.6	16	50	D GND
D GND	15	49	P0.2
+5 V	14	48	P0.7
D GND	13	47	P0.3
D GND	12	46	AI HOLD
PFI 0/AI START	11	45	EXT STROBE
PFI 1/REF TRIG	10	44	D GND
D GND	9	43	PFI 2/AI CONV
+5 V	8	42	PFI 3/AI CTR 1 SRC
D GND	7	41	PFI 4/AI CTR 1 GATE
PFI 5/AO SAMP	6	40	CTR 1 OUT
PFI 6/AO START	5	39	D GND
D GND	4	38	PFI 7/AI SAMP
PFI 9/CTR 0 GATE	3	37	PFI 8/CTR 0 SRC
CTR 0 OUT	2	36	D GND
F OUT	1	35	D GND

FIGURA 3.2.2 PINES TARJETA PCI 6024E

xPC Target es una solución para probar los sistemas en tiempo real que despliegan usando el hardware de un PC estándar. Es un ambiente

que utiliza una PC Target (computadora remota), separada de un PC Host (computadora principal), para correr aplicaciones en tiempo real.

En el PC Host contiene el programa de MATLAB para crear un modelo usando bloques de Simulink. Después de crear el modelo, se puede correr las simulaciones en tiempo no real.

xPC Target permite agregar bloques de I/O al modelo, y utiliza el PC Host con Real-Time Workshop y un recopilador de C/C++ para crear el código ejecutable. El código ejecutable se descarga del PC Host al PC Target en el cual funciona el kernel en tiempo real de la xPC Target. Después de descargar el código ejecutable, se puede correr y probar la aplicación en tiempo real:

- **Requerimientos especiales de hardware:** El programa xPC Target requiere un PC Host, un PC Target, y para manejar las señales de entrada/salida (I/O) se necesita una tarjeta de adquisición de datos que se instala en el PC Target que soporte xPC Target.

- **Requerimientos especiales de software:** El software xPC Target requiere un compilador, Microsoft C/C++ (versión.5.0, 6.0, o 7.0) o un compilador Watcom C/C++ (versión 10.6 o 11.0). Además, xPC Target requiere, MATLAB, Simulink, y Real-Time Workshop.

3.2.1. Configuración de xPC Target

Para poder realizar la comunicación entre el PC Host con el PC Target se debe primero configurar ciertos parámetros en las propiedades del xPC Target, como se muestra a continuación:

- En la ventana de comandos de Matlab escriba,

```
>>xpcsetup
```

En la cual se abre la siguiente ventana, figura 3.2.1.1

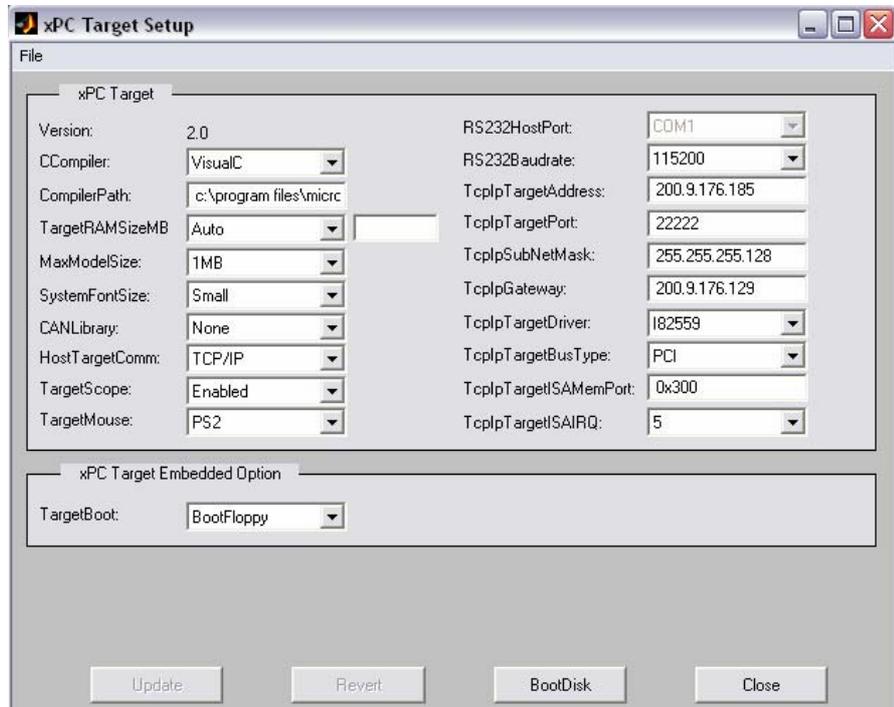


FIGURA 3.2.1.1 XPCSETUP

La ventana de xPC Target Setup tiene dos secciones:

- xPC Target.
- xPC Target Embedded Option

Si la licencia no incluye la opción embedded, la lista TargetBoot está deshabilitada con BootFloppy como única opción. Con la opción de xPC Target Embedded instalada, se tiene opciones adicionales como DOSLoader y StandAlone.

- De la lista CCompiler, seleccione VisualC o Warcom.
- En el CompilerPath, ingrese la ruta donde está instalado el compilador C/C++.
- Desde la lista Host/TargetComm, seleccione TCP/IP. Los bloques TCP/IP se activaran.

Se ingresa las siguientes propiedades con los correctos valores acorde con la red LAN ya que la conexión al Pc Target se realiza por medio de la red Ethernet.

- TcplpTargetAddress.- Esta es la dirección IP del PC Remoto.
- TcplpSubnetMask.- Es la dirección de la máscara de la subred de la LAN.
- TcplpTargetPort.- Esta propiedad es por default 22222. Este valor no causa ningún problema, debido a que el número es mayor que el área reservada (telnet, ftp, etc.) y este es el único valor importante en el PC Target.
- TcplpGateway.- Esta propiedad es por default 255.255.255.255. Esto significa que no usa gateway para conectarse al PC Target. Si la conexión desde el PC Host

está dentro de la LAN, no se necesita definir una gateway ni cambiar el valor.

- TcplpTargetDrive.- Desde la lista seleccione NE2000, SMC91C9X, I82559, RTLANCE. Está por default NE2000.
- TcplpTargetBusType.- Por default está PCI.
- Al finalizar los cambios en las propiedades, se debe presionar el botón Update.

Después de actualizar los cambios en la configuración de xpcsetup se debe crear el diskette de booteo, para ello se presionar el botón BootDisk. Este diskette es el disco de arranque para el PC Target y permitirá realizar la comunicación entre el PC Host con el Target.

3.2.2 Curvas del sistema

En esta sección se van a mostrar las gráficas del sistema; voltaje generado (V_g), frecuencia del generador (F_g) para luego finalizar esta sección con un estudio comparativo con las curvas obtenidas en el capítulo 1 y en el capítulo 2.

En la figura 3.2.2.1 se muestra el sistema a lazo abierto en donde las variables manipuladas son:

- Voltaje control del variador de frecuencia (**Vc**).
- Voltaje de campo del alternador (**Vf**).

Y las variables a controlar son las siguientes:

- Frecuencia del generador (**Fg**).
- Voltaje generado (**Vg**).

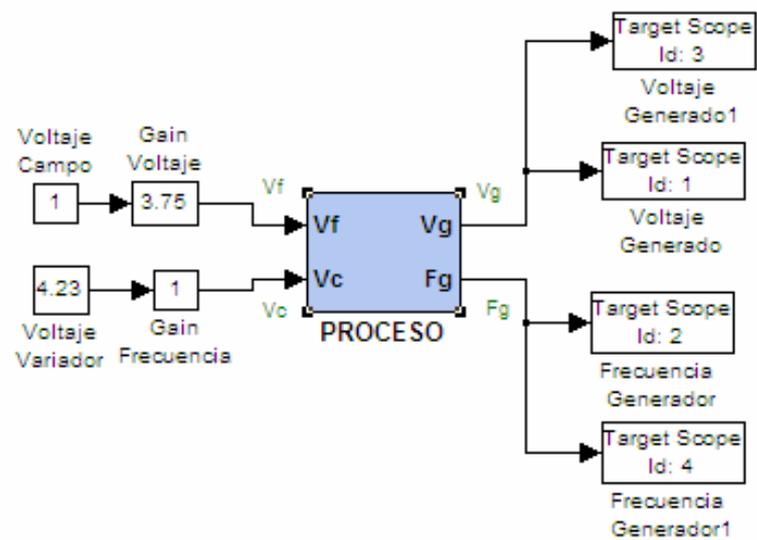


FIGURA 3.2.2.1 SISTEMA A LAZO ABIERTO

En el bloque proceso el cual se muestra con detalle en la figura 3.2.2.2, es un subsistema que representa la planta. Consta de los bloques de entrada y salida de la tarjeta de adquisición PCI-6024E de la National Instrument, el bloque de filtro me permite eliminar la señal de ruido para visualizarla mejor las señales en los osciloscopios y las ganancias se utiliza para adecuar la señal.

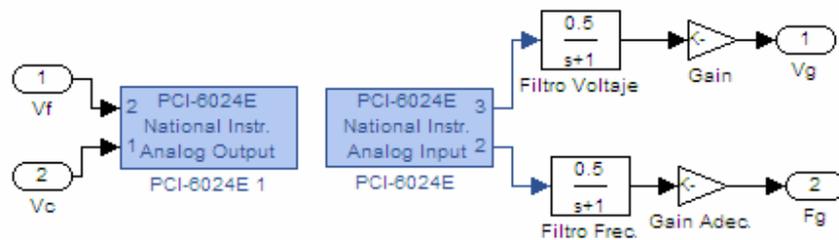


FIGURA 3.2.2.2 BLOQUES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA PLANTA, SUBSISTEMA PROCESO

3.2.2.1 Gráficas del sistema manteniendo constante el voltaje de campo (Vf) y variando el voltaje de control del variador (Vc)

Para variar el voltaje Vc se lo realiza por medio del bloque de Simulink Generador de Pulsos, el cual se encuentra en la librería Sources, en la figura 3.2.2.1.1 se

muestra el sistema a lazo abierto con el bloque Generador de Pulsos. A los 20 segundos Por medio del switch entra la señal del Generador de Pulsos a perturbar el sistema.

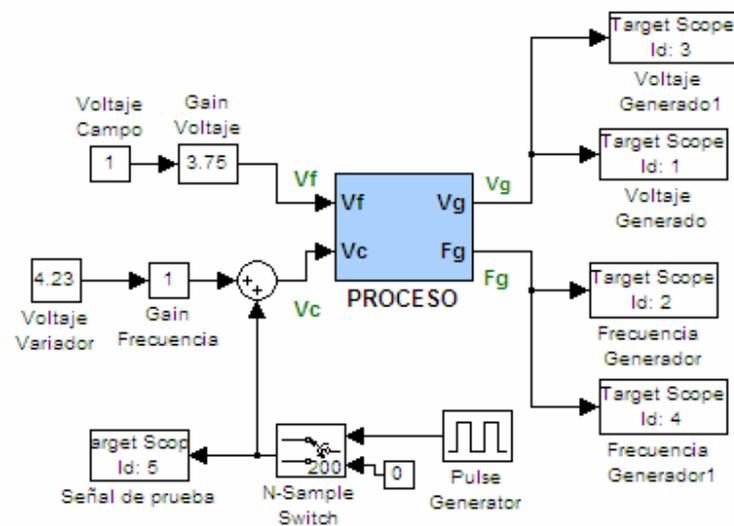


FIGURA 3.2.2.1.1 SISTEMA A LAZO ABIERTO CON EL BLOQUE GENERADOR DE PULSOS

Este bloque va a sumar y restar un valor de 0.25 al voltaje del variador de frecuencia lo que va a permitir variar la velocidad del motor y por ende varia la frecuencia del generador. Al variar la frecuencia del generador también hay una variación en el voltaje

generado aun manteniendo el voltaje de campo del alternador constante, por lo que se dice que existe una interrelación entre V_c y V_g , el cual ya se lo ha estudiado en el capítulo 1 y 2. En la figura 3.2.2.1.2 se muestra las curvas de la frecuencia del generador y el voltaje generado.

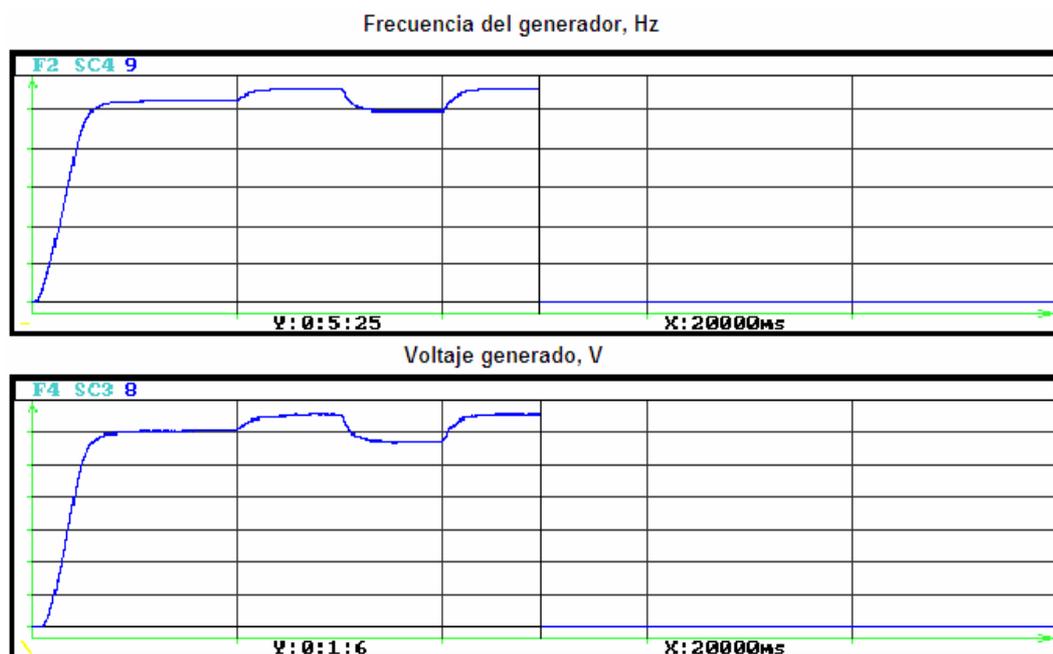


FIGURA 3.2.2.1.2 FRECUENCIA DEL GENERADOR Y VOLTAJE GENERADO,
VARIANDO V_c

3.2.2.2 Gráficas del sistema manteniendo constante el voltaje de control del variador (V_c) y variando el voltaje de campo (V_f)

En la figura 3.2.2.2.1 se muestra el sistema a lazo abierto con la señal de prueba la cual permite variar el voltaje de campo del alternador (V_f) y se mantiene sin variar el voltaje de control del alternador (V_c), esta señal es la misma que se muestra en la figura 3.2.2.1.2.

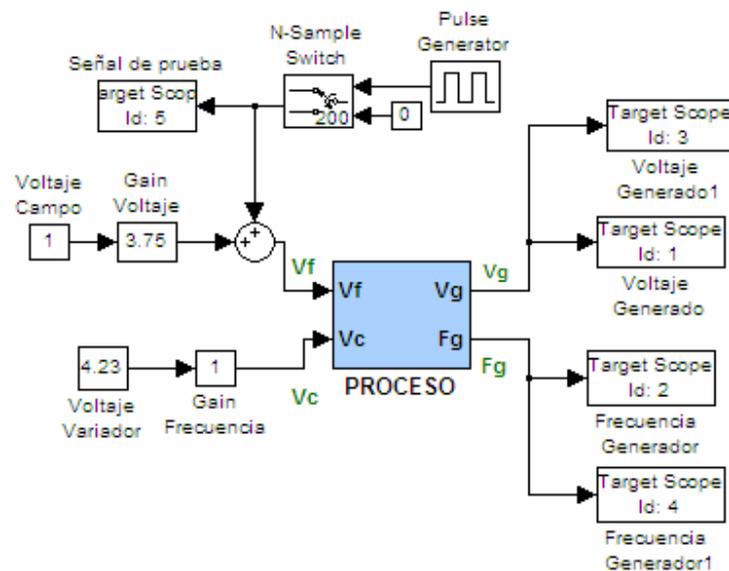


FIGURA 3.2.2.2.1 SISTEMA A LAZO ABIERTO VARIANDO V_f

Al variar el voltaje de campo varia el voltaje generado lo cual se muestra en la figura 3.2.2.2 y también se puede observar que no afecta la variación de V_f a la frecuencia del generador (F_g), por lo que F_g no se relaciona con V_f .

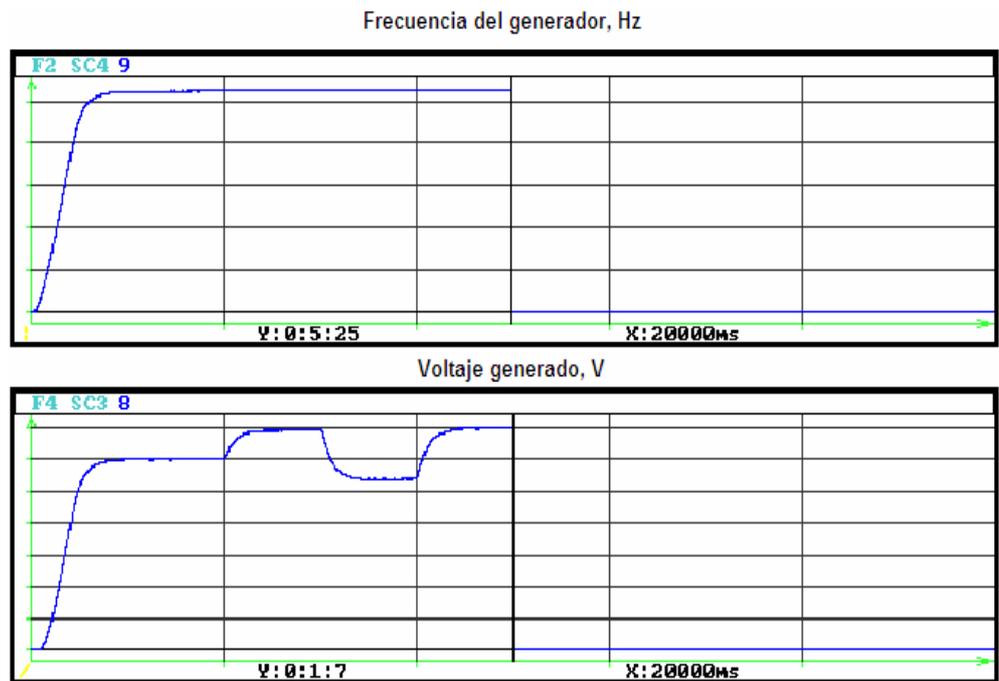


FIGURA 3.2.2.2 FRECUENCIA DEL GENERADOR Y VOLTAJE GENERADO, VARIANDO V_f

3.2.2.3 Gráficas del sistema manteniendo constante el voltaje de control del variador de frecuencia (V_c), el voltaje de campo (V_f) y variando la carga

Para determinar las curvas del sistema del voltaje generado (V_g) y la frecuencia del generador (F_g) al ingresar la carga al sistema, se va a utilizar el sistema a lazo abierto que se muestra en la figura 3.2.2.1, la carga de perturbación es de 38 ohm. En la figura 3.2.2.3.1 se muestra las gráficas de V_g y F_g , en el cual se observa el efecto que causa la perturbación a las variables a controlar (V_g , F_g).

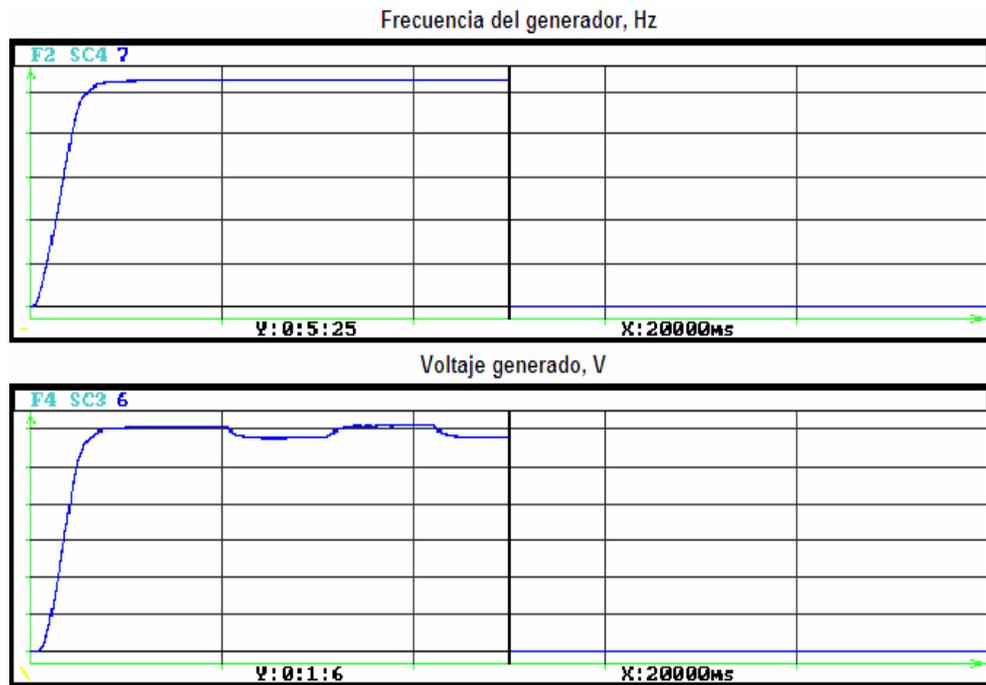


FIGURA 3.2.2.3.1 FRECUENCIA DEL GENERADOR Y VOLTAJE GENERADO, CON PERTURBACIÓN

Las relaciones entre las variables manipuladas y las controladas se mantienen, por lo que el modelo matemático y simulado se ajusta a lo real, el estudio previo permite tener una idea más clara de lo que se puede esperar al realizar las pruebas con la planta a tiempo real.

Se puede concluir que al haber una variación en V_c afecta a la variable controlada F_g y al haber una variación en F_g existe un cambio en V_g . Al variar V_f afecta a la variable a controlar V_g pero no a F_g . Por lo que se dice que existe un lazo semicruzado en el sistema.

3.3 Función de transferencia del sistema

Para determinar la función de transferencia del sistema a lazo abierto primero se debe determinar la matriz de desacoplamiento para luego por medio de System Identification determinar la función de transferencia de nuestro sistema.

3.3.1 Cálculo de la matriz de desacoplamiento

A menudo encontramos procesos en los cuales más de una variable debe ser controlada, ese es el objetivo del control múltiple; en este caso son dos las variables a controlar: el voltaje generador (V_g) y la frecuencia del generador (F_g). En algunos procesos, se puede considerar cada control de variable separado

de las otras cuando no interactúan entre ellas. Este sistema se refiere como *sistema de control multivariable* o como sistema de control *múltiple-entrada, múltiple-salida (MIMO)*. El problema que se va a manejar es el *lazo de interacción*, se debe encontrar la respuesta y estabilidad del sistema multivariable

La interacción ocurre cuando el voltaje de control del variador de frecuencia (V_c) varía y se produce un cambio en la frecuencia del generador (F_g) y esto causa un cambio en el voltaje generado (V_g). Pero no ocurre lo mismo cuando hay una variación en el voltaje de campo del alternador (V_f), al variar V_f cambia el voltaje generador pero no la frecuencia del generador, por lo que se dice que no hay interrelación entre estas variables.

Usamos la medida de interacción para seleccionar el par de variables controladas y manipuladas para minimizar el efecto de interacción; para ello se debe primero determinar la Matriz de Ganancia de Estado Estacionario de circuito abierto (MGEE), la cual se muestra a continuación:

$$K_{11} = \left. \frac{\Delta Vg}{\Delta Vf} \right|_{Vc} \quad K_{12} = \left. \frac{\Delta Vg}{\Delta Vc} \right|_{Vf}$$

$$K_{21} = \left. \frac{\Delta Fg}{\Delta Vf} \right|_{Vc} \quad K_{22} = \left. \frac{\Delta Fg}{\Delta Vc} \right|_{Vf}$$

- MGEE

$$\begin{bmatrix} \Delta Vg \\ \Delta Fg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Vf \\ \Delta Vc \end{bmatrix}$$

$$K_{11} = \frac{9.92 - 0.47}{4 - 2} = 4.7$$

$$K_{12} = \frac{6.9 - 0.55}{5 - 1.5} = 1.61$$

$$K_{21} = \frac{30 - 30}{2.75 - 2.5} = 0$$

$$K_{22} = \frac{13.17 - 10.25}{2.5 - 2} = 5.84$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Vg \\ \Delta Fg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.7 & 1.61 \\ 0 & 5.84 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Vf \\ \Delta Vc \end{bmatrix}$$

Estos valores de la matriz MGEE me permitirán determinar la Matriz de Ganancia Relativa (MGR) del sistema en lazo cerrado y seleccionar los pares de variables controladas y manipuladas. La matriz de ganancia relativa (MGR) es la siguiente:

$$K'_{11} = \left. \frac{\Delta Vg}{\Delta Vf} \right|_{Fg} \quad K'_{12} = \left. \frac{\Delta Vg}{\Delta Vc} \right|_{Fg} \quad K'_{21} = \left. \frac{\Delta Fg}{\Delta Vf} \right|_{Vg} \quad K'_{22} = \left. \frac{\Delta Fg}{\Delta Vc} \right|_{Vg}$$

$$\mu_{ij} = \frac{\left. \frac{\partial c_i}{\partial m_j} \right|_m}{\left. \frac{\partial c_i}{\partial m_j} \right|_c} = \frac{K_{ij}}{K'_{ij}}$$

Donde c_i son las variables controladas y m_j las variables manipuladas.

- MGR

$$\begin{vmatrix} \Delta Vg \\ \Delta Fg \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} \\ \mu_{21} & \mu_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta Vf \\ \Delta Vc \end{vmatrix}$$

Utilizando el método de Bristol obtenemos los valores para K'_{ij}

$$\Delta Vg = K_{11}\Delta Vf + K_{12}\Delta Vc$$

$$\Delta Fg = K_{21}\Delta Vf + K_{22}\Delta Vc \Rightarrow \Delta Fg = K_{21}\Delta Vf + K_{22}\Delta Vc = 0$$

$$\Delta Vc = -\frac{K_{21}}{K_{22}}\Delta Vf$$

$$\Delta Vg = K_{11}\Delta Vf - K_{12}\frac{K_{21}}{K_{22}}\Delta Vf$$

$$K'_{11} = \left. \frac{\Delta Vg}{\Delta Vf} \right|_{Fg} \Rightarrow K'_{11} = K_{11} - K_{12}\frac{K_{21}}{K_{22}}$$

$$K'_{11} = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{K_{22}} \quad K'_{12} = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{-K_{21}}$$

$$K'_{21} = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{-K_{12}} \quad K'_{22} = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{K_{11}}$$

Las ganancias relativas μ_{ij} se la obtiene por definición, la MGR es la siguiente:

$$\begin{vmatrix} \Delta Vg \\ \Delta Fg \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{k_{11}k_{22}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} & -\frac{k_{12}k_{21}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} \\ -\frac{k_{12}k_{21}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} & \frac{k_{11}k_{22}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta Vf \\ \Delta Vc \end{vmatrix}$$

$$\mu_{11} = \frac{4.7(5.84)}{4.7(5.84) - 1.61(0)} = 1$$

$$\mu_{12} = -\frac{1.61(0)}{4.7(5.84) - 1.61(0)} = 0$$

$$\mu_{21} = -\frac{1.61(0)}{4.7(5.84) - 1.61(0)} = 0$$

$$\mu_{22} = \frac{4.7(5.84)}{4.7(5.84) - 1.61(0)} = 1$$

- MGR

$$\begin{vmatrix} \Delta Vg \\ \Delta Fg \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta Vf \\ \Delta Vc \end{vmatrix}$$

- Por medio del índice de interrelación se determinan los pares de variables relacionadas:

$$I_{ij} = \left| \frac{1 - \mu_{ij}}{\mu_{ij}} \right|$$

$$I_{11} = \left| \frac{1-1}{1} \right| = 0 \quad I_{12} = \left| \frac{1-0}{0} \right| = \infty$$

$$I_{21} = \left| \frac{1-0}{0} \right| = \infty \quad I_{22} = \left| \frac{1-1}{1} \right| = 0$$

Los pares de variables que están interrelacionadas son: Vg–Vf,
Fg–Vc

Se debe rediseñar el sistema incorporando un **desacoplador** de tal forma que la combinación proceso-desacoplador resulte en dos circuitos de control que parezcan independientes. Para el sistema desacoplado, un cambio en la salida del controlador 1, en este caso Vc, debe producir un cambio en la frecuencia del generador (Fg) pero no en el voltaje generador (Vg); de la misma manera para el otro lazo de control.

Para el diseño de la matriz desacoplador estático para el sistema se lo realiza de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Gp_{11} & Gp_{12} \\ Gp_{21} & Gp_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & D_{12} \\ D_{21} & 1 \end{bmatrix}$$

Donde $N_i(s)$ son las funciones de transferencia que se desean.

Un algoritmo para encontrar la matriz del desacoplador $[D]$, se obtiene:

$$[B] = [Gp]^{-1} \quad B_{ji} = \frac{1}{k'_{ij}}$$

$$B_{ji} = \begin{bmatrix} 0.212 & -0.058 \\ 0 & 0.171 \end{bmatrix}$$

$$D_{ij} = \frac{B_{ij}}{B_{jj}}$$

- Desacoplador

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.276 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3.2 Determinación de las funciones de transferencia del sistema

Para determinar las funciones de transferencia de la planta el toolbox de System Identification permite construir de forma exacta modelos simplificados de sistemas complejos. Proporciona las herramientas para crear los modelos matemáticos de los sistemas dinámicos basados en datos observados de la entrada-salida.

System Identification ofrece una interfaz gráfica flexible que ayuda en la organización de datos y de modelos, permite construir modelos matemáticos de un sistema dinámico basado en datos medidos.

Debido a que son dos variable de entrada y dos las variables de salida a controlar se hace el análisis una por una, manteniendo una constante y variando la otra variable a controlar, las funciones de transferencia se van a obtener a lazo abierto con la matriz de desacoplamiento calculada en la sección 3.3.1, el sistema se muestra en la figura 3.3.2.1. La primera función de transferencia a obtener es manteniendo el voltaje generado y variando la frecuencia del generador, se obtiene la relación frecuencia del generador vs voltaje control variador y para determinar la segunda función se mantiene constante la frecuencia y se variando el voltaje de campo para obtener la relación voltaje generado vs voltaje de campo.

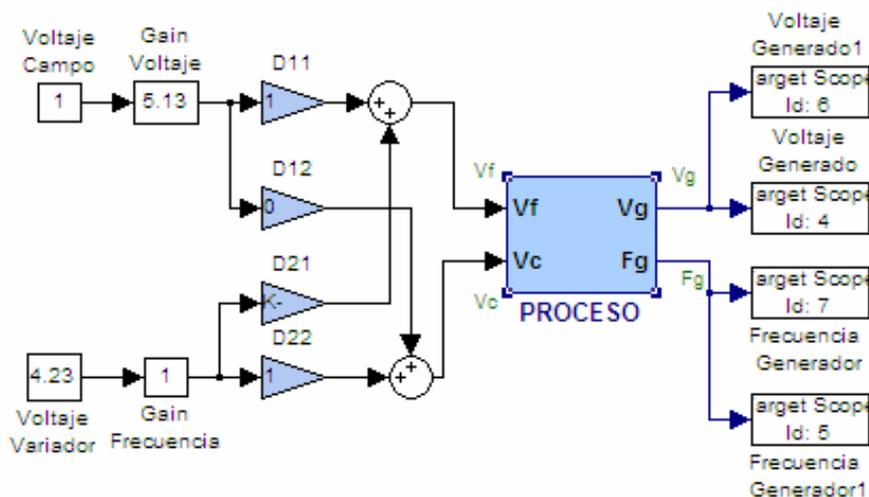


FIGURA 3.3.2.1 SISTEMA A LAZO ABIERTO CON DESACOPLADOR

3.3.2.1 Función de transferencia del sistema F_g/V_c manteniendo constante el voltaje de campo (V_f)

Para obtener la función se debe adquirir los datos de la planta. En la figura 3.3.2.1.1 se muestra el sistema para la adquisición de datos, como se puede observar el bloque Generador de pulsos permite variar el voltaje V_c de 4.23 a 4.63 lo cual varía la velocidad del motor y por tanto la frecuencia del generador.

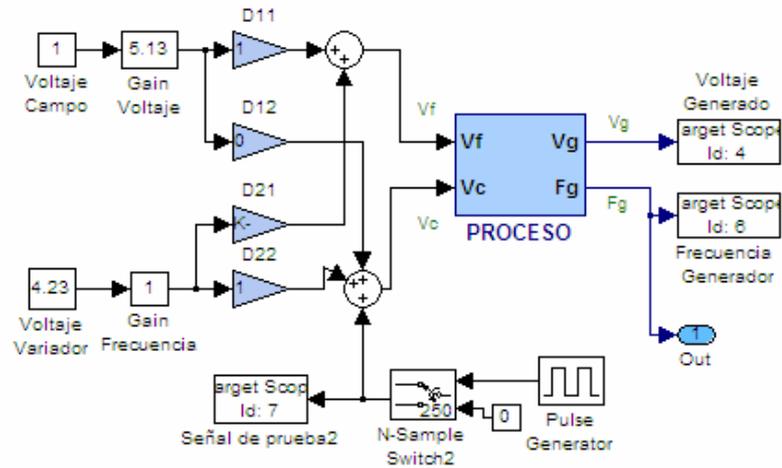


FIGURA 3.3.2.1.1 SISTEMA A LAZO ABIERTO
VARIANDO V_c

Los datos de las variables F_g y V_c son adquiridos por medio del bloque Out, para guardarlos en las variables se debe escribir en la ventana de comandos de MatLab lo siguiente:

```
>>fg=tg.outputlog;
```

```
>>vc= tg.outputlog;
```

En la figura 3.3.2.1.2 se muestra las gráficas de las variables adquiridas (f_g, v_c).

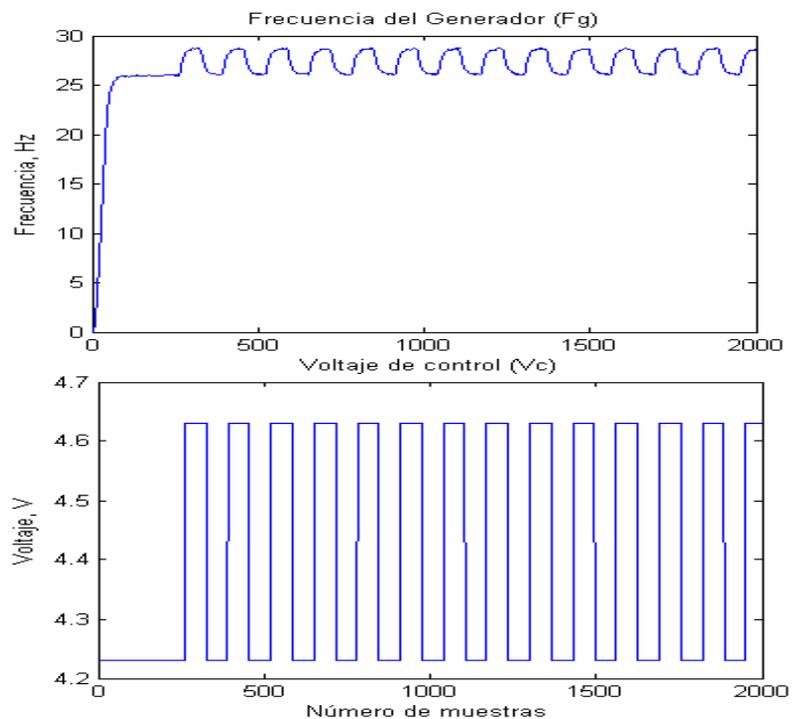


FIGURA 3.3.2.1.2 GRAFICA DE fg Y vc

Los datos que se van a utilizar son entre las muestras 130:2000, para ello se realiza lo siguiente:

```
>>fg1=fg(260:2000);
```

```
>>vc1=vc(260:2000);
```

Estas variables (fg1 y vc1) me van a permitir obtener la función de transferencia de mi sistema por medio de System Identification. Para ello se realizaron los siguientes pasos:

- En la pantalla de comandos de MATLAB tipee:

```
>>Ident
```

Muestra la siguiente ventana, figura 3.3.2.1.3.

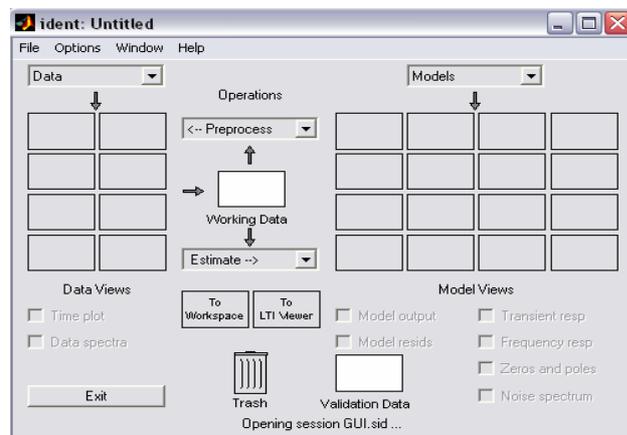


FIGURA 3.3.2.1.3: VENTANA IDENT

- Al desplegar la lista de *Data*, selecciones *Import*.
Donde aparece la siguiente ventana, figura 3.3.2.1.4:

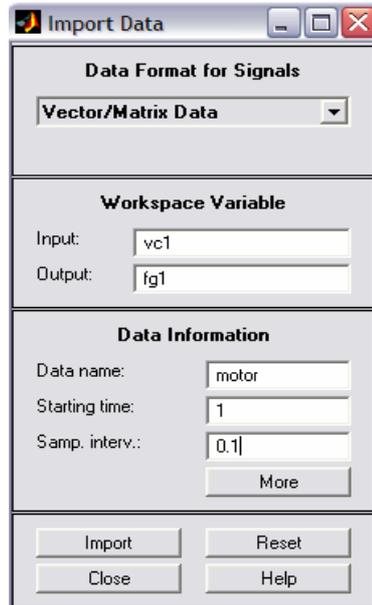


FIGURA 3.3.2.1.4 IMPORT DATA

En *Input* se coloca el nombre de la variable de entrada, que es **cv1**, en *Output* la variable de salida **fg1**, en *Samp. interv.*, es el intervalo de muestreo que es de 0.1. Con el botón *Import* se cargan los datos en la pantalla *Ident* como se la figura 3.3.2.1.5.

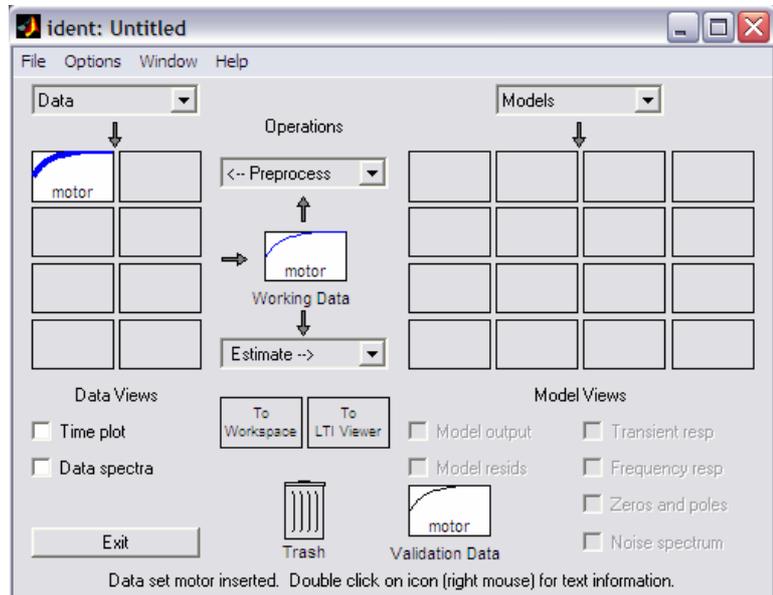
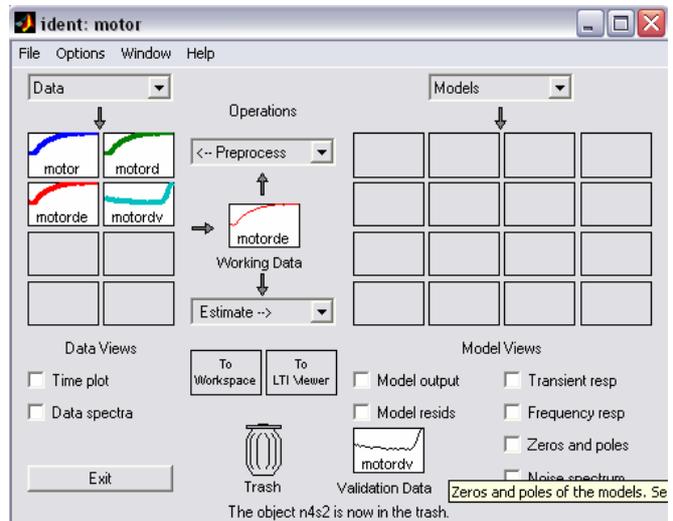
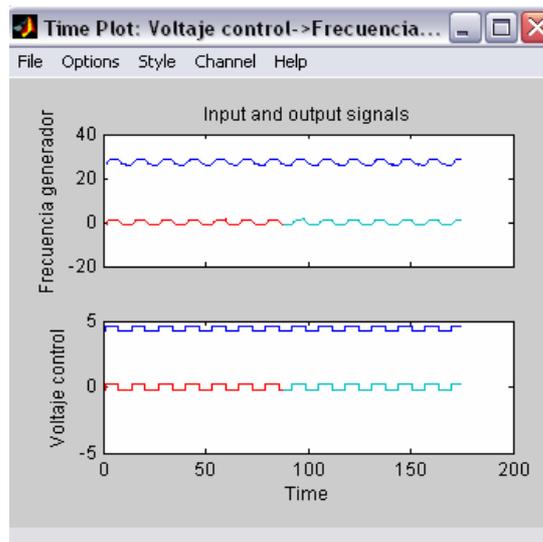


FIGURA 3.3.2.1.5 VENTANA IDENT CON CARGA DE LOS DATOS

- En la lista *Preprocess* se selecciona la opción **Quick Start**, el cual en la tabla de datos se cargan los datos: *motord*, que son los datos sin constante de nivel; *motorde* que es una porción de los datos los cuales System los va a utilizar para la estimación del modelo; *motordev* el cual es la siguiente porción de los datos con los cuales se va a realizar la validación del modelo que genera System. La figura 3.3.2.1.6 muestra el resultado.



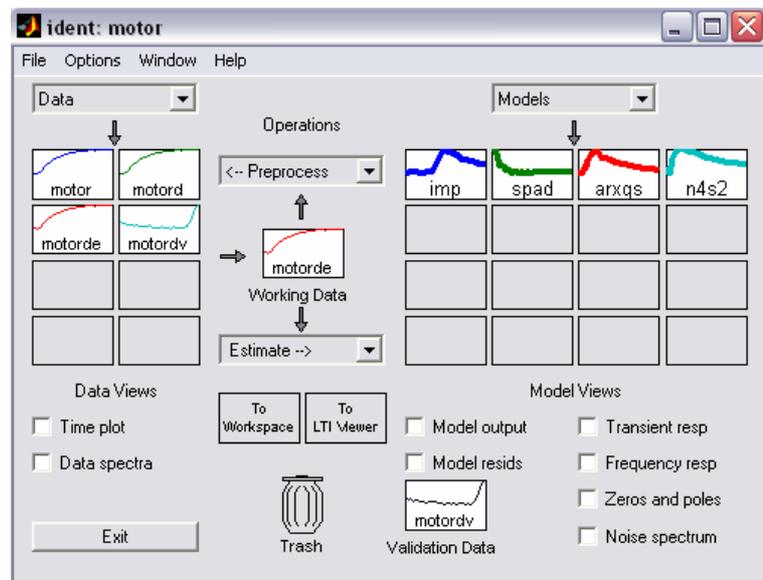
(A)



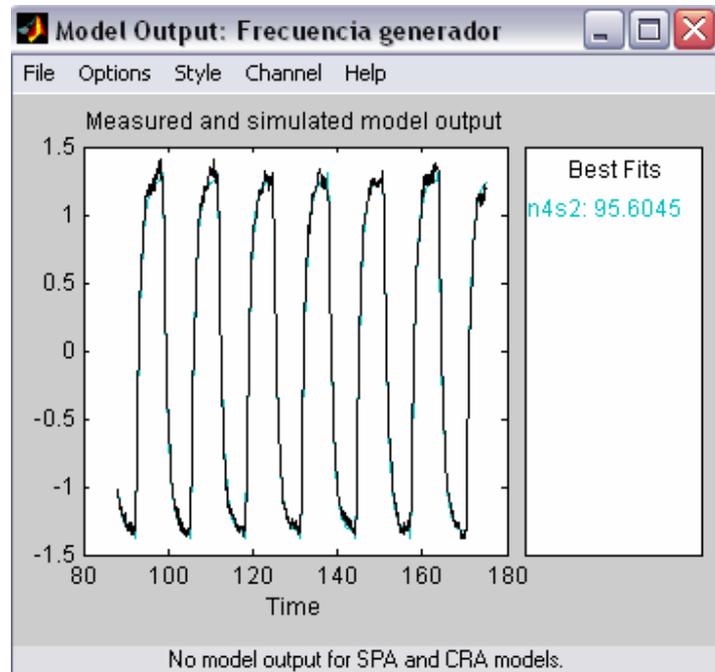
(B)

FIGURA 3.3.2.1.6 A) DATOS PROCESADOS; B) VOLTAJE CONTROL, SEÑAL DE ENTRADA Y FRECUENCIA GENERADOR, SEÑAL DE SALIDA

- De la lista *Estimate* seleccione la opción **Quick Start**, esta opción realiza la estimación de los modelos matemáticos del sistema, en la tabla de los modelos se cargan la respuesta al impulso (imp), la respuesta de frecuencia del sistema (spad) y los modelos para un sistema discreto (arxqs) y para un sistema continuo (n4s2). Figura 3.3.2.1.7.



(A)



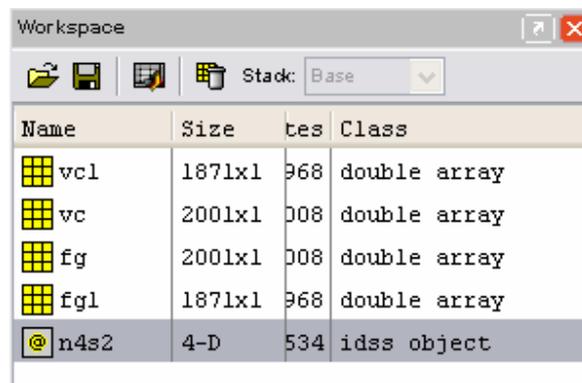
(B)

FIGURA 3.3.2.1.7 A) MODELOS ESTIMADOS; B)
MODELOS DE LA SEÑAL DE
SALIDA

Como se puede observar en la figura 3.3.2.1.7 (B) en Best fits muestra el porcentaje en que los modelos estimados se acercan al real. En el sistema se va a usar el modelo **n4s2** ya que es el modelo para un sistema continuo.

- Para llevar el modelo al workspace se debe arrastrar el modelo deseado al ícono **To Workspace**, el cual se carga con el modelo en el workspace de MatLab.

Figura 3.3.2.1.8.



The screenshot shows the MATLAB Workspace window with a table of variables. The table has four columns: Name, Size, bytes, and Class. The variables listed are vcl, vc, fg, fg1, and n4s2. The n4s2 variable is highlighted in grey, indicating it is the current selection.

Name	Size	bytes	Class
vcl	1871x1	968	double array
vc	2001x1	1008	double array
fg	2001x1	1008	double array
fg1	1871x1	968	double array
n4s2	4-D	534	idss object

FIGURA 3.3.2.1.8 MODELO N4S2

- Para trabajar con el modelo se debe escribir en la ventana de comandos de MatLab, lo siguiente:

```
>>tf(n4s2)
```

Se muestra en la ventana de comando la función de transferencia del modelo en Transformada Z. Figura 3.3.2.1.9.

```

Command Window
>> tf(n4s2)

Transfer function from input "Voltaje control" to output "Frecuencia generador":
-0.1445 z + 0.4306
-----
z^2 - 1.443 z + 0.4875

Transfer function from input "v@Frecuencia generador" to output "Frecuencia generador":
0.06752 z^2 - 0.06363 z + 0.008834
-----
z^2 - 1.443 z + 0.4875

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

Sampling time: 0.1
>>

```

FIGURA 3.3.2.1.9 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL MODELO N4S2

La primera función de transferencia que muestra es la relacionada al sistema y la segunda es respecto al error del modelo estimado con respecto al real. Para almacenar estas funciones de transferencia en una variable se realiza lo siguiente:

- En la ventana de comandos de MatLab escriba el nombre de la función de transferencia:

```
>>zmotor=tf(num,den,0.1);
```

Donde num, den es el numerador y denominador de la función de transferencia que se quiere guardar, y 0.1 es el tiempo de muestreo para la transformada Z. En la figura 3.3.2.1.10 se muestra la ventana de comandos de MatLab con los pasos para obtener la función de transferencia.

```
>> zmotor=tf(num,den,0.1)
```

```
Transfer function:
  -0.1445 z + 0.4306
-----
z^2 - 1.443 z + 0.4875

Sampling time: 0.1
```

FIGURA 3.3.2.1.10 FUNCION DE TRANSFERENCIA
DEL MODELO EN TRANSFORMADA Z

Para pasar la Transformada Z a Transformada de Laplace se debe utilizar el comando **d2c**, el cual nos permite pasar de discreto a continuo, figura 3.3.2.1.11:

```
>> smotor=d2c(zmotor)
```

```
Transfer function:
```

```
  -4.315 s + 40.32
```

```
-----  
s^2 + 7.185 s + 6.238
```

FIGURA 3.3.2.1.11 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA
EN TRANSFORMADA DE LAPLACE

smotor es la función de transferencia del modelo fg/vc cuando vf permanece constante.

3.3.2.2 Función de transferencia del sistema V_g/V_f manteniendo constante el voltaje de control del variador (V_c)

El sistema que se utiliza para la adquisición de datos se muestra en la figura 3.3.2.2.1

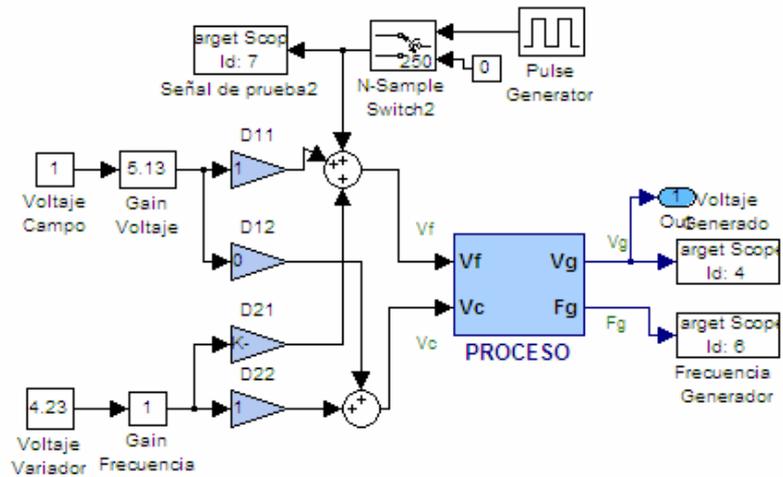


FIGURA 3.3.2.2.1 SISTEMA A LAZO ABIERTO
VARIANDO V_f

La adquisición de datos se la realiza como se especificó en la sección 3.3.2.1, las variables a obtener son las siguientes y se grafican en la figura 3.3.2.2.2:

```
>>vg=tg.outputlog;
```

```
>>vf=tg.outputlog;
```

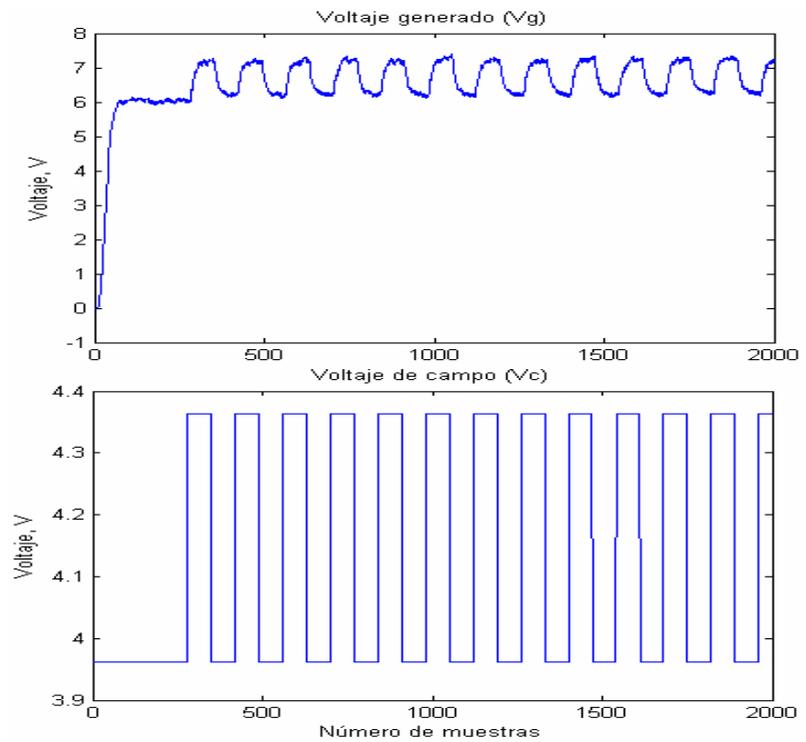
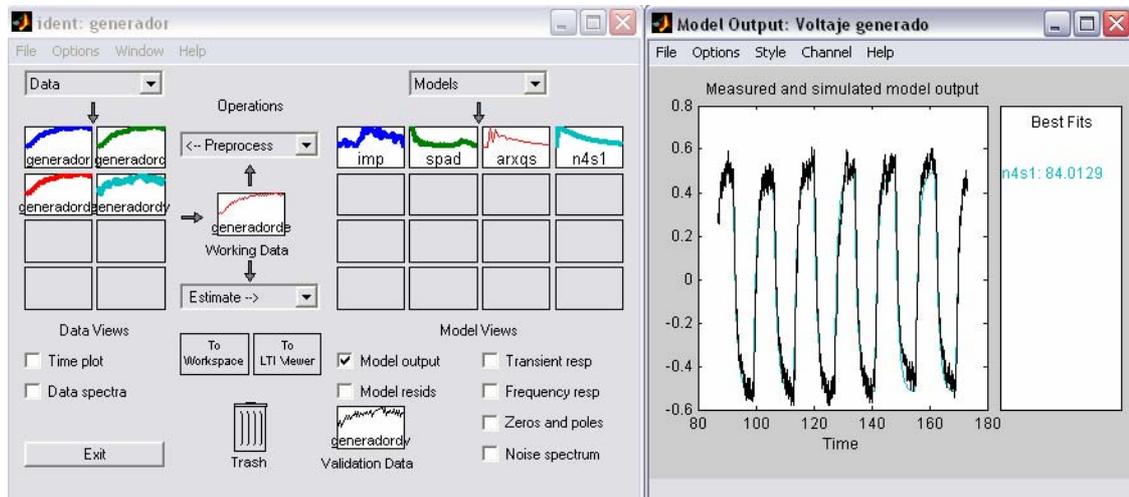


FIGURA 3.3.2.2.2 GRAFICO DE v_g Y v_f

Con las variables v_f y v_g se siguen los pasos mencionados en la sección 3.4.1.1 para obtener la función de transferencia del sistema v_g/v_f . A continuación se muestran los resultados de System Identification, figura 3.3.2.2.3.

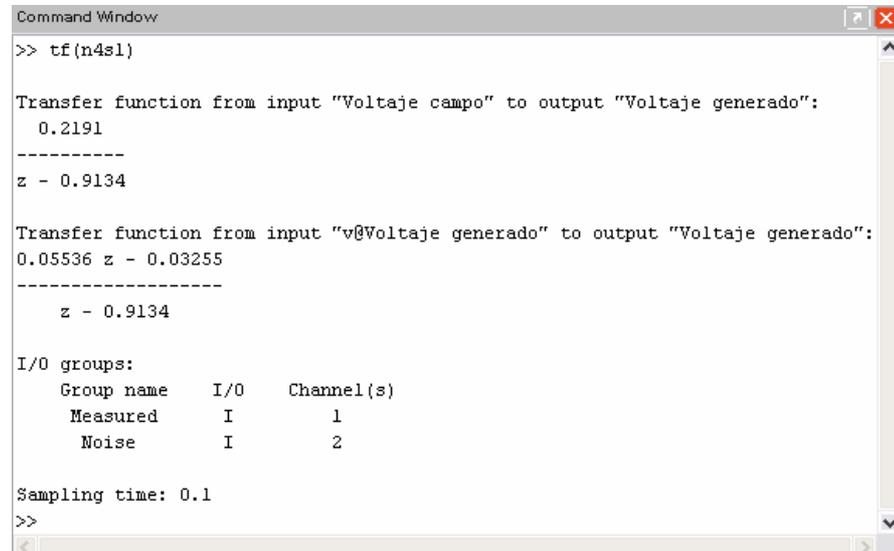


(A)

(B)

FIGURA 3.3.2.2.3 A) MODELOS ESTIMADOS DEL SISTEMA V_g/V_f ; B) MODELO N4S1

El modelo a elegir es n4s1, en la figura 3.3.2.2.4 se muestra la función de transferencia en Transformada Z del modelo.



```

Command Window
>> tf(n4s1)

Transfer function from input "Voltaje campo" to output "Voltaje generado":
  0.2191
-----
z - 0.9134

Transfer function from input "v@Voltaje generado" to output "Voltaje generado":
0.05536 z - 0.03255
-----
z - 0.9134

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

Sampling time: 0.1
>>

```

FIGURA 3.3.2.2.4 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL MODELO DEL GENERADOR EN TRANSFORMADA Z

En la figura 3.3.2.2.5 se muestra la función de transferencia del modelo en transformada de Laplace.

```

>> zgenerador=tf(num,den,0.1)

Transfer function:
  0.2191
-----
z - 0.9134

Sampling time: 0.1
>> sgenerador=d2c(zgenerador)

Transfer function:
  2.292
-----
s + 0.9054

```

FIGURA 3.3.2.2.5 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL GENERADOR

sgenerador es la función de transferencia del modelo v_g/v_f .

3.4 Controladores de la planta

La herramienta SISO se usó para determinar los controladores de la planta, esta herramienta es una interfaz gráfica (GUI) que permite el análisis de sistemas de control retroalimentado. Usando la herramienta SISO, se puede ajustar gráficamente los aumentos y la dinámica del compensador (C) y del prefiltro (F) usando una mezcla del lugar geométrico de las raíces y colocándolos de forma táctica. Por ejemplo, se puede utilizar el criterio del lugar geométrico de las raíces para estabilizar el lazo de retroalimentación, para hacer cumplir cierto amortiguamiento mínimo, y utiliza los diagramas de Bode para ajustar el ancho de banda, comprueba la ganancia y los márgenes de fase o agrega un filtro de muesca para rechazar el disturbio, por medio de análisis como la respuesta del sistema al comando Escalón, se puede observar el comportamiento del sistema al ajustar el compensador y el prefiltro.

Puede también trabajar con el criterio de diagrama de Nichols a lazo abierto o el diagrama de Bode los cuales selecciona desde el menú View. Todas las opciones están ligadas dinámicamente; es decir, si se cambia la ganancia en el lugar geométrico de las raíces afecta inmediatamente los diagramas de Bode y al análisis de la respuesta al Escalón, figura 3.4.1

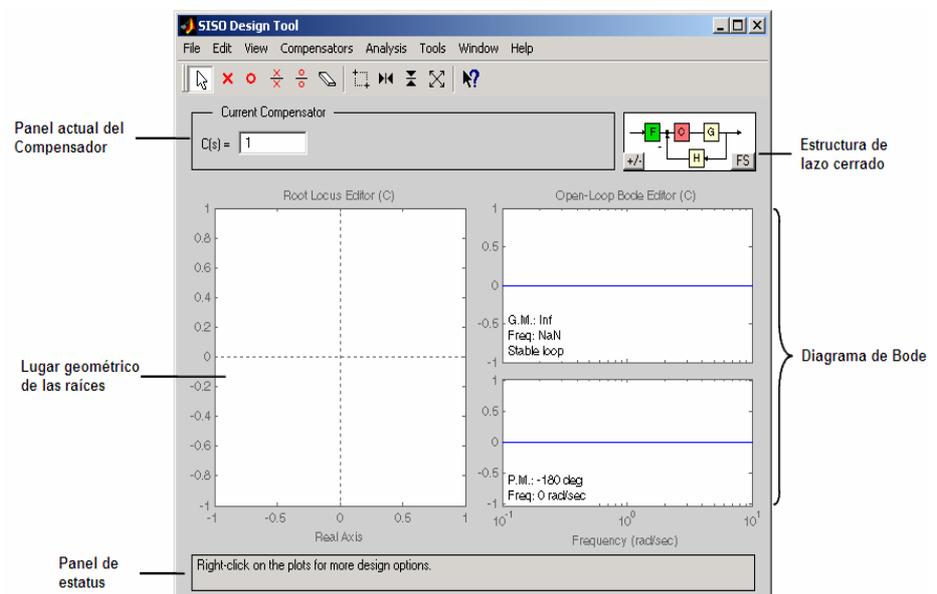


FIGURA 3.4.1 HERRAMIENTA SISO

3.4.1 Diseño de controladores de forma analítica

3.4.1.1 Diseño del controlador del sistema Fg/Vc

Para la obtención del controlador se utiliza la función de transferencia del sistema Fg/Vc, la cual fue estimada por medio de System Identification en la sección 3.3.2.1 (smotor). En la ventana de comandos de MatLab se escribe:

```
>>sisotool(smotor)
```

La figura 3.4.1.1.1 muestra la ventana de SISO con el diagrama de la trayectoria de las raíces. Como se puede observar en la figura el sistema es de segundo grado con dos polos reales (-1.01 y -6.18) y un cero real en el lado positivo a 9.34. El cero en el lado positivo muestra que en algún momento el sistema se vuelve inestable, esto es debido a que al tratarse de equipos mecánicos pueden llegar a dañarse.

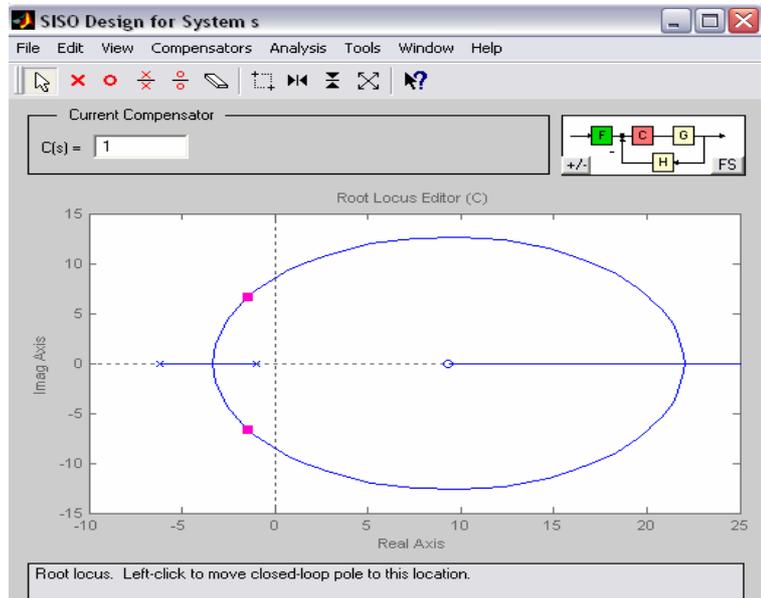


FIGURA 3.4.1.1.1 TRAYECTORIA DE LAS RAICES DEL SISTEMA F_g/V_c

En la figura 3.4.1.1.2 se muestra la respuesta al comando Escalón, como se puede observar se necesita mejorar el error de estado estacionario y mejorar el tiempo de estabilización del sistema, el cual se lo realiza por medio de un controlador proporcional integral (controlador PI)

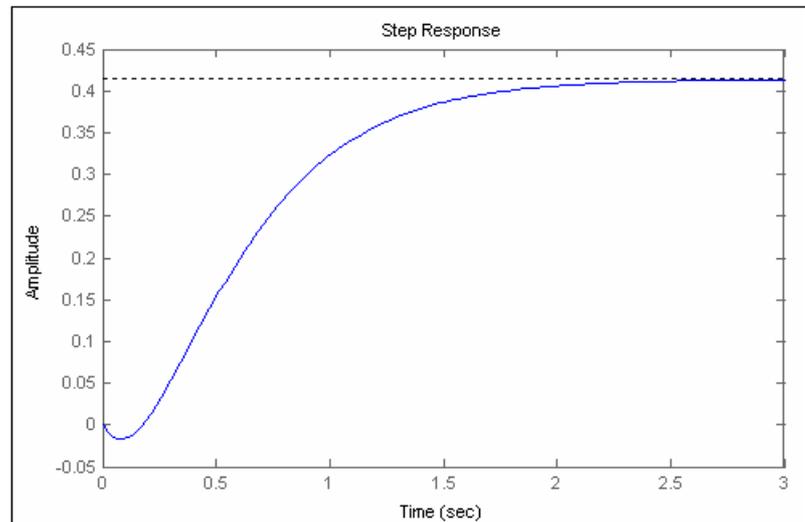


FIGURA 3.4.1.1.2 RESPUESTA AL ESCALÓN DEL SISTEMA FG/VC

Para la determinación del controlador se considera un sobre nivel porcentual $< 2\%$ y un tiempo de estabilización < 8.5 s, debido a que la respuesta del motor es lenta. En la figura 3.4.1.1.3 se muestra la gráfica de la trayectoria de las raíces del sistema con la obtención del controlador.

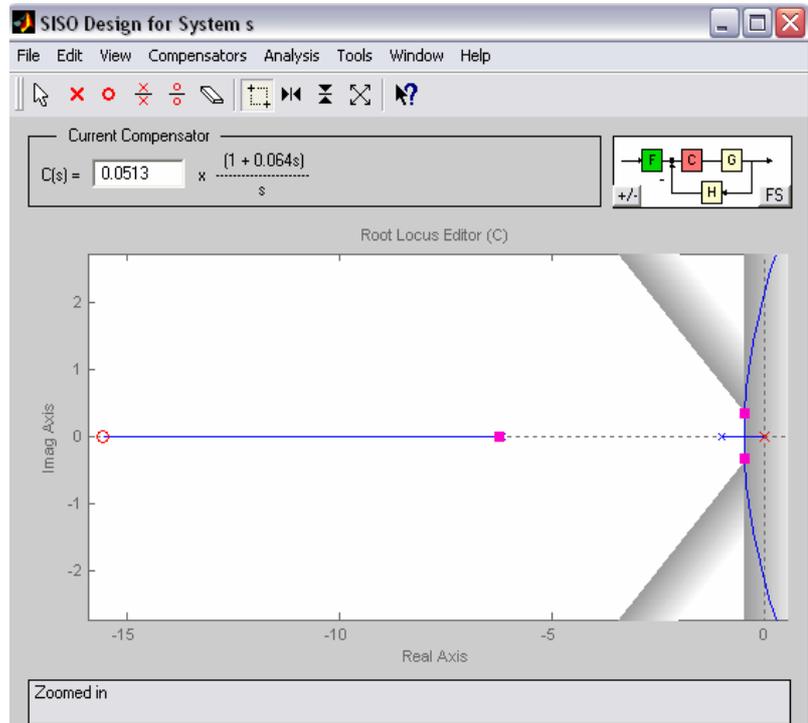


FIGURA 3.4.1.1.3 TRAYECTORIA DE LAS RAICES DEL SISTEMA CON EL CONTROLADOR PI

Como se explicó anteriormente en esta sección, el controlador a utilizar es de la forma PI, por lo cual tiene un polo en el origen y un cero real ubicado en -15.6. En la figura 3.4.1.1.3 se muestra el controlador del sistema:

$$PI \Rightarrow 0.0513 \frac{(1 + 0.064s)}{s}$$

En la figura 3.4.1.1.4 se muestra la respuesta al Escalón del sistema, se puede observar que el error de estado estacionario es cero y tiene un tiempo de estabilización < 8.5 s.

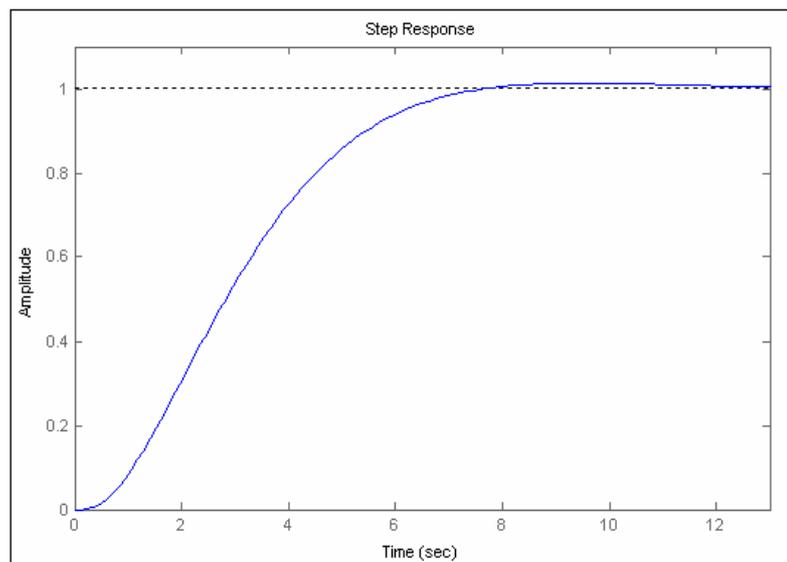


FIGURA 3.4.1.1.4 RESPUESTA AL ESCALON DEL SISTEMA CON EL CONTROLADOR PI

3.4.1.2 Diseño del controlador del sistema V_g/V_f

Al igual que en la sección 3.4.1.1 para determinar el controlador del sistema V_g/V_f se utiliza la función de transferencia del sistema a lazo abierto la cual fue

determinada en la sección 3.3.2.2 (sgenerador). En la gráfica 3.4.1.2.1 se muestra la trayectoria de las raíces, el sistema es de primer orden con un polo en -0.905. En la ventana de comandos de MatLab se escribe lo siguiente:

```
>>sisotool(sgenerador)
```

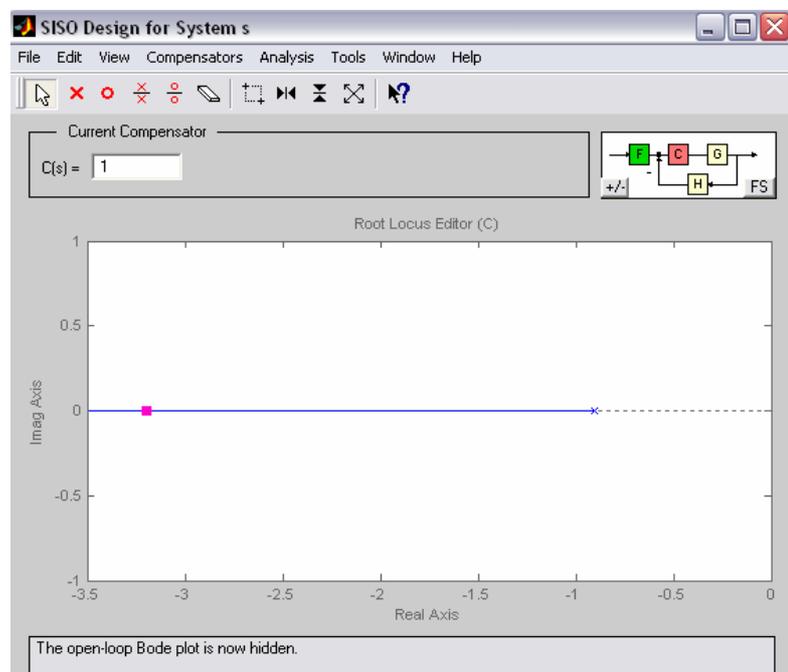


FIGURA 3.4.1.2.1 TRAYECTORIA DE LAS RAICES DEL SISTEMA V_g/V_f

La respuesta al Escalón del sistema se lo muestra en la figura 3.4.1.2.2. Como se puede observar existe el error

de estado estacionario por lo cual se utiliza un controlador PI para mejorar el error de estado estacionario y el tiempo de estabilización del sistema.

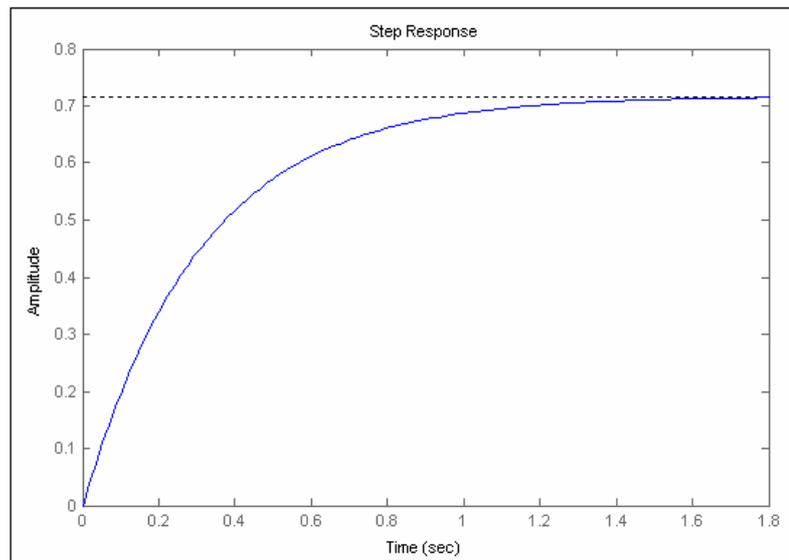


FIGURA 3.4.1.2.2 RESPUESTA DEL SISTEMA AL ESCALÓN

Para la determinación del controlador se va a considerar un tiempo de estabilización < 2.54 s, estas condiciones se consideró de acuerdo al tiempo de respuesta del alternador. En la figura 3.4.1.2.3 se muestra la trayectoria de las raíces del sistema con el controlador

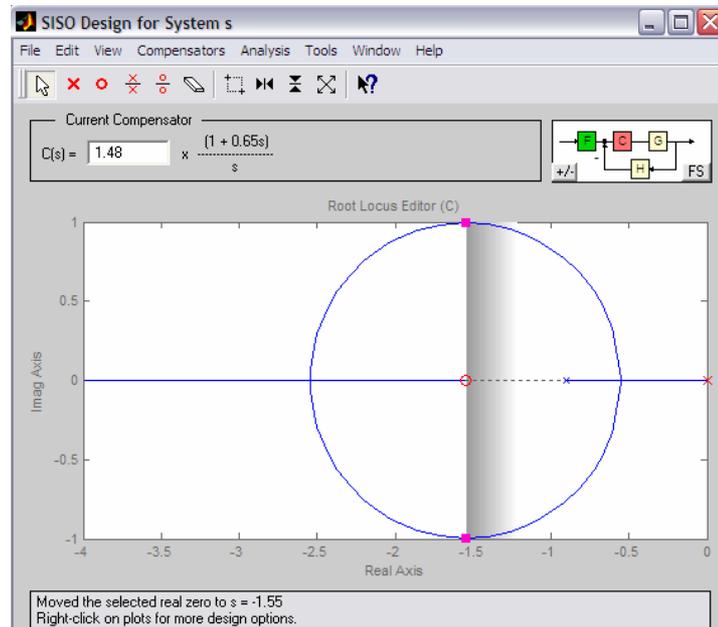


FIGURA 3.4.1.2.3 TRAYECTORIA DE LAS RAICES DEL SISTEMA VG/VF CON EL CONTROLADOR PI

Por ser un controlador PI se ubica un polo en el origen y un cero real en -1.55, el controlador del sistema es el siguiente:

$$PI \Rightarrow 1.48 \frac{(1 + 0.65s)}{s}$$

En la figura 3.4.1.2.4 se muestra la respuesta al Escalón del sistema con el controlador PI, como se muestra en la

figura el error de estado estacionario disminuyó a cero y el tiempo de estabilización es de 2.54 s.

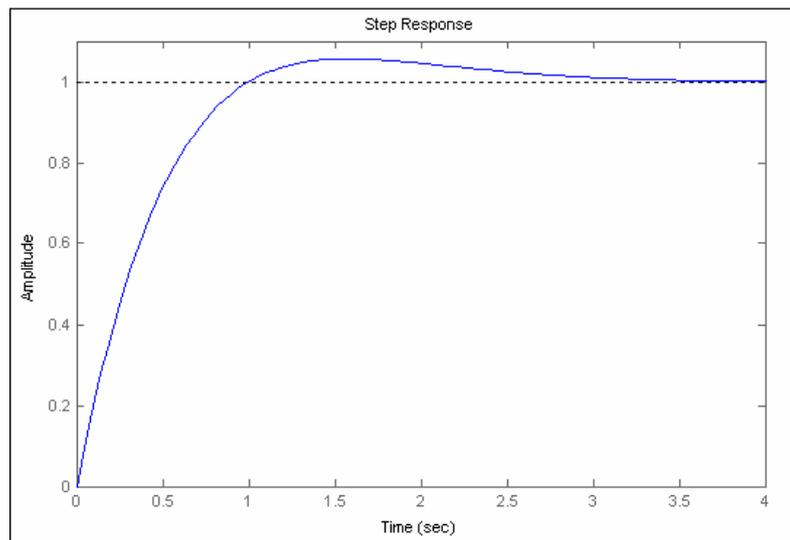


FIGURA 3.4.1.2.4 RESPUESTA AL ESCALON DEL SISTEMA VG/VF CON EL CONTROLADOR PI

Podemos concluir por medio de las gráficas de la respuesta al Escalón del sistema Fg/Vc (modelo del motor) y Vg/Vf (modelo del generador), el sistema del motor tiene una respuesta más lenta (de 8.5 s) comparada con el sistema del generador el cual su respuesta es más rápida (de 2.54 s).

3.4.2 Diseño de controladores de forma empírica

Para calcular de forma empírica los controladores del sistema se trabaja con el sistema a lazo abierto y con las curvas de trabajo de las variables a controlar, usando el método de Ziegler-Nichols.

3.4.2.1 Controlador del sistema Fg/Vc

Con el sistema en lazo abierto en el cual se incluye la matriz de acopladores, figura 3.4.2.1.1, para calcular el PI del sistema se debe variar la variable a manipular del sistema (V_c) de 0 a 5 V para la variación de la variable a controlar (F_g). En la figura 3.4.2.1.2 se muestra la curva de F_g .

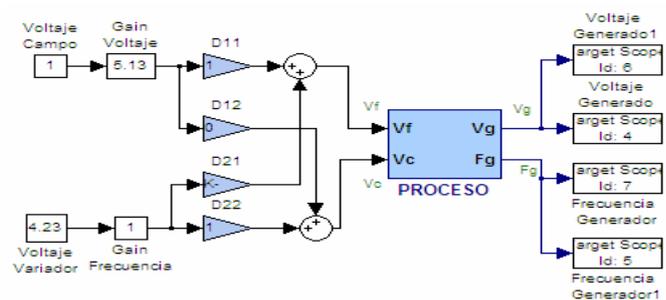


FIGURA 3.4.2.1.1 SISTEMA A LAZO ABIERTO CON DESACOPLADOR

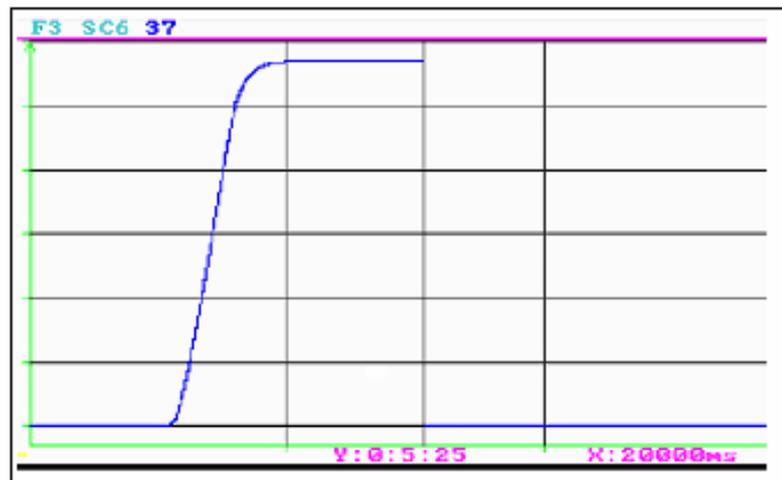


FIGURA 3.4.2.1.2: CURVA DE FRECUENCIA DEL GENERADOR

Con la curva de frecuencia (figura 3.4.2.1.2), se calcula k_p y T_i . Figura 3.4.2.1.3

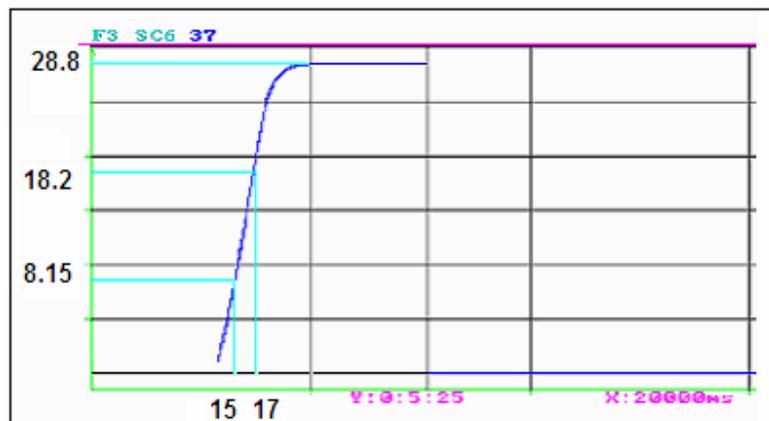


FIGURA 3.4.2.1.3 CURVA DE FG

t_1 a 0.283 de 28.8 es igual a 8.15 = 15 seg

t_2 a 0.632 de 28.8 es igual a 18.2 = 17 seg

$$Tao = 3/2 (t_2 - t_1) = 3/2 (2) = 3$$

$$K = AC / Am = 30 / 28.8 = 1.04$$

Tenemos que el controlador es el siguiente:

$$PI \Rightarrow \frac{1.04}{3s + 1}$$

3.4.2.2 Controlador del sistema V_g/V_f

Con el mismo método con el que obtuvo el controlador PI del sistema F_g/V_c se determina el controlador PI del sistema V_c/V_f variando el voltaje de campo de 0 a 3 manteniendo el voltaje de variador constante a un valor de 4. En la figura 3.4.2.2.1 se muestra la gráfica del voltaje generado.

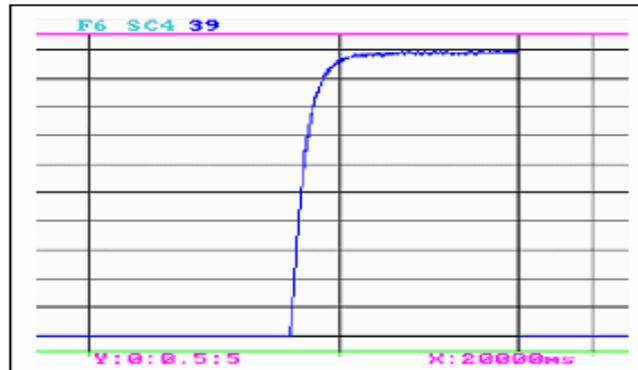


FIGURA 3.4.2.2.1 CURVA DEL VOLTAJE GENERADO

Con la curva de voltaje generado, se calcula los valores respectivos de k y T_i para el controlador. En la figura 3.4.2.2.2 se muestra la curva de trabajo de V_g .

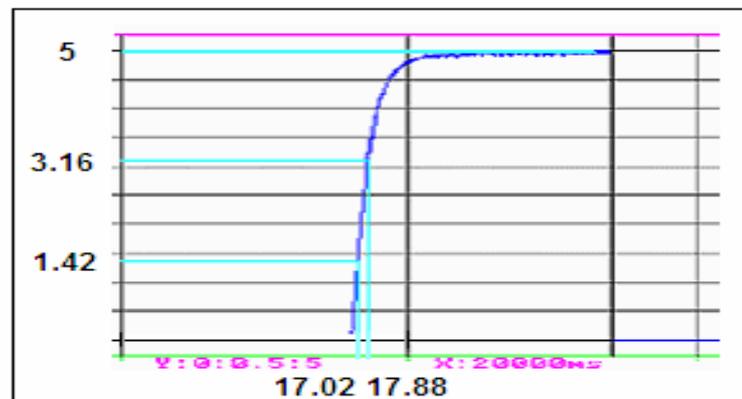


FIGURA 3.4.2.2.2 VOLTAJE GENERADO

t_1 a 0.283 de 5 es igual a 1.42 = 17.02 s

t_2 a 0.632 de 5 es igual a $3.16 = 17.88$ s

$Tao = 3/2 (t_2 - t_1) = 3/2 (0.86) = 1.3$

$K = AC / Am = 6 / 5.28 = 1.136$

$$PI \Rightarrow \frac{1.136}{1.3s + 1}$$

Con los controladores obtenidos se completa el sistema a lazo cerrado como se muestra en la figura 3.4.2.2.3

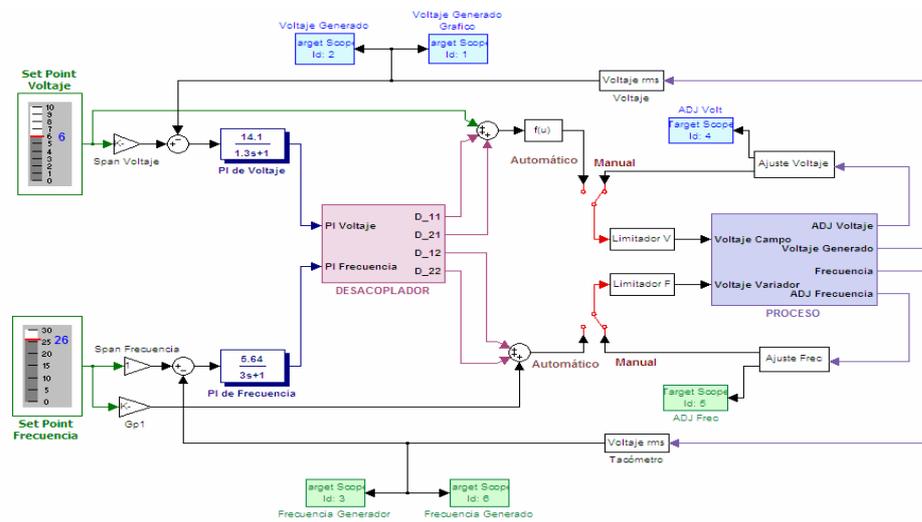


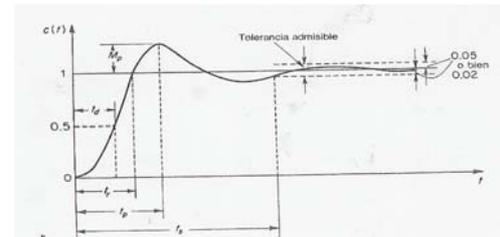
FIGURA 3.4.2.2.3 SISTEMA A LAZO CERRADO CON CONTROLADOR EMPIRICO

El método empírico es utilizado en sistemas para los cuales es complejo obtener el modelo del sistema, facilitando la obtención del controlador, pero es un

método no muy exacto, el cual se lo ajusta por medio de prueba y error usando como criterio la siguiente tabla (3.4.2.2.4):

CLOSED LOOP	RISE TIME	OVER SHOOT	SETTLING TIME	STEADY STATE ERROR
K_p	↓	↑	⇔	↓
T_i	↓	↑	↑	0
T_d	⇔	↓	↓	⇔

(A)



(B)

FIGURA 3.4.2.2.4 (A) TABLA DE TENDENCIAS DE PARAMETROS; (B) CURVA CARACTERISTICA DE UN SISTEMA

3.4.3 Operación del sistema

Una vez que hemos obtenido el controlador del sistema, procederemos a explicar el funcionamiento del sistema a lazo cerrado. Nuestro sistema consta de un bloque que nos permiten ingresar y sacar señales de Simulink al sistema físico. El bloque de entrada tiene cuatro señales y el bloque de salidas tiene dos señales que son (figura 3.4.3.1):

- Señal de Voltaje generado: conectado por el canal 2 en el pin de la tarjeta de entrada número 65 recibe la señal de voltaje generado real.
- Señal de Frecuencia generada: conectado por el canal 1 en el pin de la tarjeta de entrada número 33 recibe la señal de voltaje del tacómetro quién nos indica en que valor de frecuencia se encuentra el voltaje generado.
- Señal de ajuste de Voltaje manual: conectado por el canal 12 en el pin de la tarjeta de entrada número 31 recibe la señal de ajuste de voltaje manual por parte del potenciómetro externo.
- Señal de ajuste de Frecuencia manual: conectado por el canal 3 en el pin de la tarjeta de entrada número 30 recibe la señal de ajuste de frecuencia manual por parte del potenciómetro externo
- Señal de Voltaje de Campo: conectado por el canal 1 en el pin de la tarjeta de entrada número 21 envía la señal de voltaje de campo al sistema electrónico de amplificación y de allí al generador.

- o Señal de Voltaje de control del variador: conectado por el canal 0 en el pin de la tarjeta de entrada número 22 envía la señal de voltaje al alternador.

Nota: Para ampliar esta información revisar anexo H

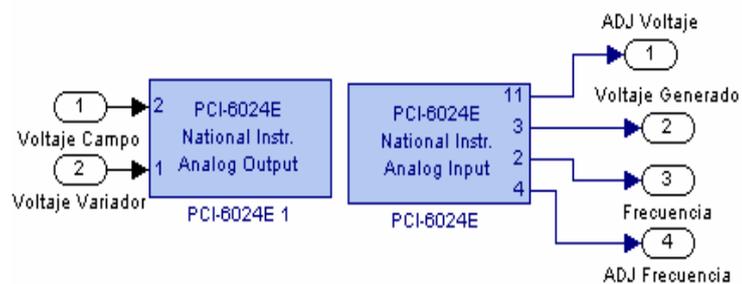


FIGURA 3.4.3.1 BLOQUES DE ENTRATA Y SALIDA DE SEÑALES

Las señales de entrada de voltaje y frecuencia después de ingresar al sistema lógico, pasan por un bloque de filtro para evitar tener ruido en la señal (retroalimentación), luego ingresa a un bloque de resta (comparación), donde se compara el valor real con el valor seteado por el usuario anteriormente. Entre el valor seteado y el bloque de comparación se encuentra una ganancia, llamado span (voltaje o frecuencia), que nos permite calibrar el sistema y permitir que el valor generado (voltaje o frecuencia) sea

el deseado, produciéndose un ajuste lógico de señal. La diferencia obtenida en la comparación, es el valor en que el valor real difiere del valor de setado, dicho valor positivo o negativo (según el caso) ingresa al controlador integral el cual nos ayuda a controlar dos características del sistema que son: tiempo de estabilización y sobre nivel porcentual. Luego la señal pasa por el desacoplador de señales cuya finalidad es aislar los sistemas de las variables controladas, es decir, que el control de las variables sean independientes. Esta señal que es una diferencia es sumada con el valor seteado obteniendo el nuevo valor de control, el cuál para ser convertida en señal de campo debe pasar por un bloque de relación, donde se modifica la señal de seteo lógico a señal de acción de campo; en la caso de la señal de voltaje es un bloque de función y en el caso de la frecuencia es uno; cuyas relaciones fueron obtenidas de las curvas características de la sección 3.1. La señal obtenida después de los bloques de relación son señales de acción de campo (voltaje de campo del generador y voltaje de control del variador); estas señales antes de salir al sistema físico pasan por un bloque que es el controlador proporcional cuya finalidad es disminuir el error de estado

estacionario del sistema y después por el bloque limitador quien evita que se envíe señales muy grandes al sistema físico que podría causar daño al sistema electrónico de adecuación de señales. Este flujo de la señal ocurre cuando el sistema se encuentra en modo automático y se muestra con línea roja el flujo de la variable de voltaje y con línea azul el flujo de la variable de frecuencia en la figura 3.4.3.2.

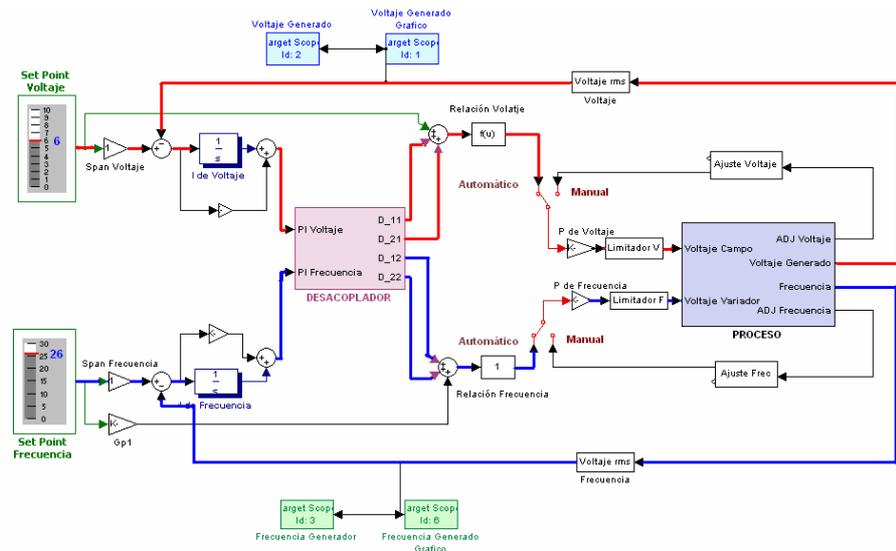


FIGURA 3.4.3.2 FLUJO DE SEÑAL EN MODO AUTOMATICO

Muchos de los sistemas reales son diseñados para que el operador pueda manipular personalmente las variables de control hasta que el sistema llegue a sus valores deseados, una vez que

haya llegado a ese punto se lo coloca en modo automático para que el sistema lo mantenga estable. Esto se lo hace por dos razones:

1. El sistema de control es diseñado para variaciones pequeñas, al momento de arranque los valores reales son cero y por lo tanto la diferencia en cada uno de lo sistema (generación de voltaje y de frecuencia) llegan a su mayor valor permisible, esto causa que todos lo valores se muevan a lo máximo manteniendo una alta probabilidad de daño en tarjetas de salida
2. Para en caso de una falla en el sistema automático de control el proceso no se detenga y pueda seguir trabajando bajo supevisión manual.

Nuestro sistema consta de dos selectores que nos permita seleccionar entre un modo de control manual o automático, uno para cada variable de control como se muestra a continuación (figura 3.4.3.3):

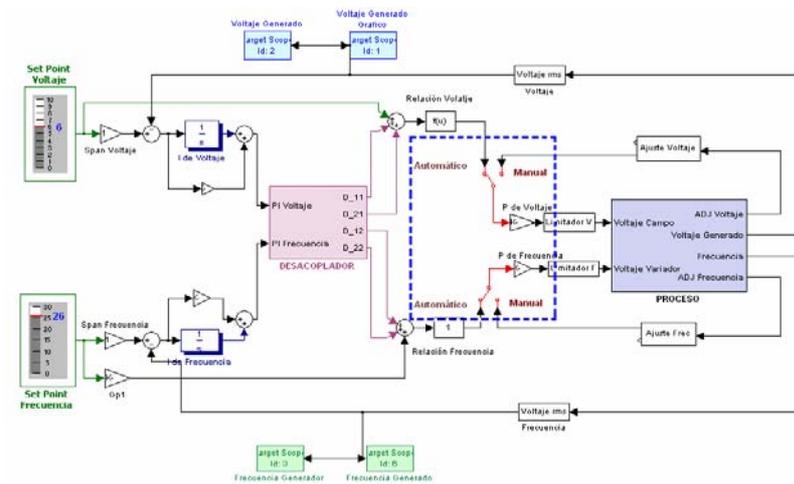


FIGURA 3.4.3.3 UBICACIÓN DE SELECTORES MANUAL-AUTOMÁTICO

Estos selectores para que se accione, deberán darse un clic con el mouse sobre el elemento. Como se puede observar en la figura 3.4.3.3 los selectores se colocaron antes de los bloques limitadores, es decir, el limitador sigue protegiendo el sistema físico (equipo, tarjetas, elementos electrónicos, etc.); a un extremo del selector se conecta el sistema automático, que al seleccionarse este camino el sistema trabajará automáticamente con la finalidad de tener el valor generado (real) igual al valor del seteador.

En el otro extremo se conecta el sistema manual de control, el cual es una señal de voltaje que el usuario pueda modificar con un potenciómetro en el exterior del computador y de salida del sistema de simulik tendremos el rango de las variables de control (accionamiento de campo) ya conocidas:

- Variable de control de voltaje de **0 a 4.5**
- Variable de control de frecuencia **0 a 5.5**.

El circuito externo son dos resistencia en serie alimentadas con 5 VDC propio de la tarjeta xPC target y donde una de las resistencia es variable, el modelo de este potenciómetro es de multi-vueltas para poder tener una variación más exacta y lineal (ver anexo E), este diseño se ha llamado ajuste de voltaje y ajuste de frecuencia respectivamente.

Las señales de voltaje que obtenida del divisor de voltaje de los circuitos de ajuste externo son los siguientes:

- Ajuste de voltaje: 0 – 1.57 VDC
- Ajuste de Frecuencia: 0 – 5 VDC

Estas señales de voltaje se relacionan con el rango de trabajo para obtener el valor de la primera ganancia, cuya finalidad es convertir de señal de campo a señal lógico.

- Voltaje: 0 – 10 VDC
- Frecuencia: 0 – 29 Hz

Por lo tanto la ganancia son las siguientes

- Adj. Voltaje: $10 / 1.57 = 6.366$
- Adj. Frecuencia: $29 / 5 = 5.88$

Con esto valores obtenemos una señal en valores de variables controladas (señal lógica), con los bloques obtenidos en la sección 3.1 se convierte en variable de control (acción de campo), como se lo hizo en el flujo de señal automática.

Por lo tanto al final lo que obtenemos es una variación externa por medio de un potenciómetro que ingresa a simulik, donde se convierte a señal de variable de control (acción de campo) y por

medio del selector sale la señal controlando así al sistema de forma manual, como se muestra en la figura 3.4.3.4.

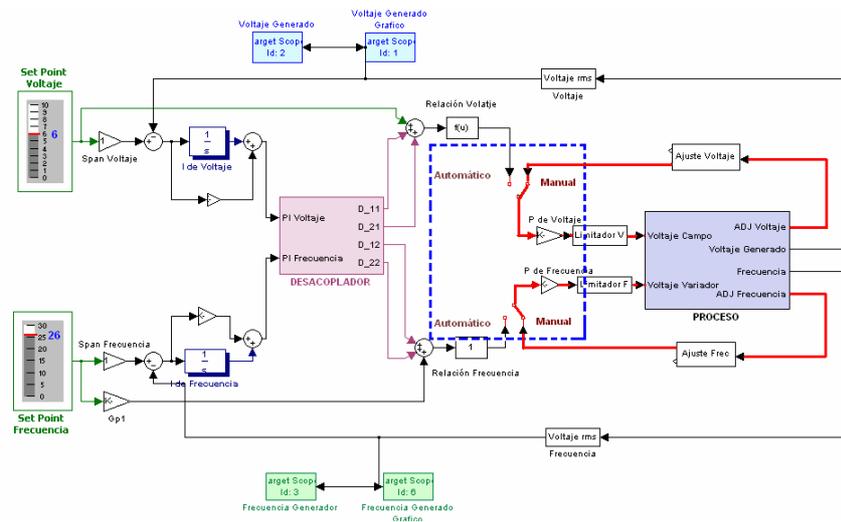


FIGURA 3.4.3.4 FLUJO DE SEÑAL EN MODO MANUAL

Cabe recalcar que las variables sólo pueden estar en manual o automático no lo dos a la vez, pero si puede estar una variable en automático mientras la otra está en manual.

Este sistema consta de algunos bloques que agrupa algunos elementos, para poder revisar su contenido se deberá dar doble click sobre el bloque que desee observar. El sistema consta de cuatro osciloscopio que nos permitirá ver las señales en el computador target, los osciloscopio son:

SC1: Voltaje generado de forma gráfica.

SC2: Voltaje generado de forma numérica

SC3: Frecuencia generada de forma numérica

SC4: Frecuencia generada de forma gráfica

La pantalla que observaremos en el target (computador de campo) será (figura 3.4.3.5):

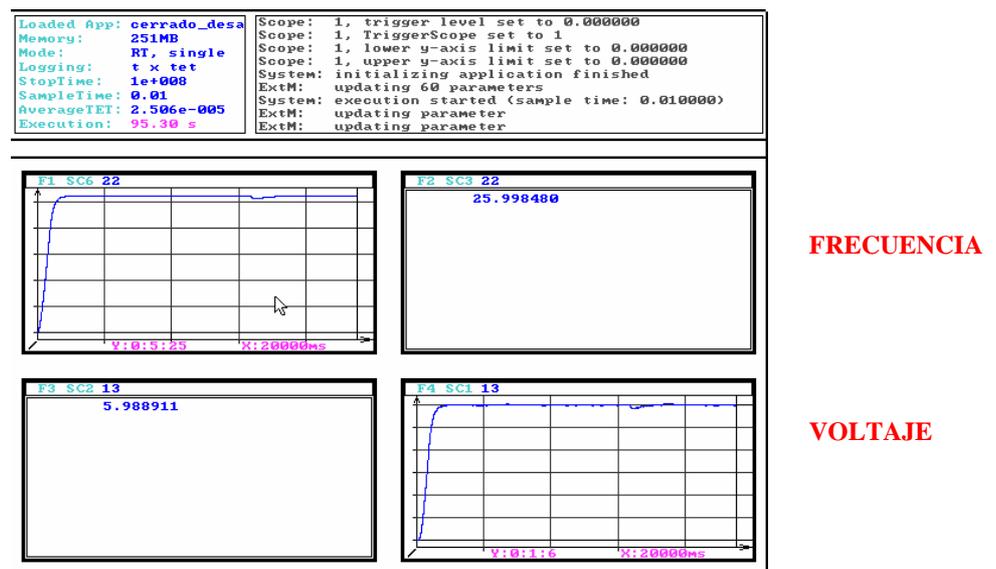
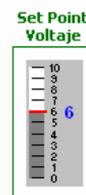


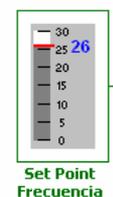
FIGURA 3.4.3.5 PANTALLA DEL PC TARGET (COMPUTADOR DE CAMPO)

Los elementos que internamente pueden moverse por parte del usuario son los siguientes:

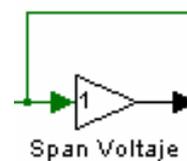
Set point Voltaje: Coloca el valor de voltaje generado en que desea que el sistema automático se setee y trabaje.



Set point de frecuencia: Coloca el valor de frecuencia generada en que desea que el sistema automático se setee y trabaje.



Span de Voltaje: En casos de desgastes de los equipos físicos este valor de ganancia permite ajustar el máximo valor deseado en voltaje generado, cabe recalcar que la diferencia máximo de ajuste es de +/- 0.5 VDC.

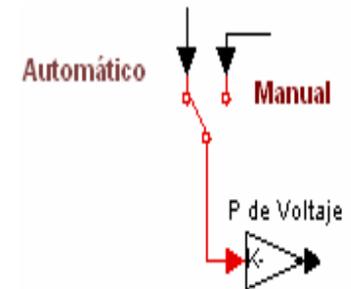


Span de Frecuencia: En casos de desgastes de los equipos físicos este valor de ganancia permite ajustar el máximo valor deseado en frecuencia generada, cabe recalcar que la diferencia máximo de ajuste es de +/- 0.5 VDC.



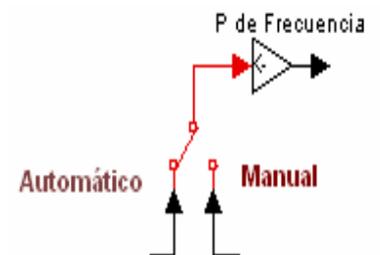
Switch Manual / Automático de Voltaje: Es

donde se selección de que modo desea trabajar el sistema, si es de modo manual se controlará con los potenciómetro externos y si es de modo automático el sistema regulará las variables de control para llegar al set point seteado en la variable de voltaje generado.



Switch Manual / Automático de Frecuencia: Es

donde se selección de que modo desea trabajar el sistema, si es de modo manual se controlará con los potenciómetro externos y si es de modo automático el sistema regulará las variables de control para llegar al set point seteado en la variable de frecuencia generada.



Conocido el sistema procedemos a indicar paso a paso la secuencia de arranque del mismo.

1. Conectar del sistema físico por medio del cable de alimentación a la toma trifásica del laboratorio.
2. Activar los breakers de control y fuerza
3. Aplastar la botonera de encendido (verde) del motor
4. Aplastar el botón de encendido del variador
5. Abrir el sistema en matlab y simulik **lazo_analitico**
6. Seleccionar el seteo deseado de frecuencia y voltaje, por diseño los valores esperados son 26 Hz y 6 VDC respectivamente.
7. Seleccionar modo manual en ambos variables
8. Compilar el sistema de simulik por medio del boton **buil all**
9. Conectar el simulik al target por medio del botón **conect to target**
10. Correr sel sistema con el botón **start real-time code**
11. Desde el exterior variar el potenciómetro hasta que los valores de voltaje y frecuencia se encuentre muy próximo al valor del seteo.
12. Una vez que el voltaje generado y la frecuencia generada se encuentren muy cerca al valor del seteado, realizar doble clik sobre los switches para pasar a modo automático. En este

momento el sistema toma el control y mantendrá los valores de las variables deseados.

13. Para incorporar una perturbación al sistema ya estabilizado, presione el botón de encendido (verde) de carga.
14. En estos momentos se observará en las pantallas la variación de todas las variables y su estabilización
15. Si desea quitar la carga presione el botón de apagado (rojo) y nuevamente existirá variaciones y estabilización de las variables.

Nota: La carga son dos focos que se encenderá juntos.

16. Una vez realizada las pruebas del caso y si desea terminar la simulación, presione el botón de **stop** y desconectar el botón de **conect to target**
17. En este momento se detendrá todo el sistema físico y podrá presionar el botón de apagado (rojo) del motor, bajar los breakers de control y fuerza y desconectar la alimentación trifásica.

Lo explicado anteriormente es un arranque y apagado básico, la práctica a realizarse tanto el sistema físico como lógico puede

variar, favor ver capítulo 5 para verificar pasos a seguir en el sistema según la práctica a realizar.

Como seguridad en el sistema seguir las siguientes indicaciones:

- No colocar objetos metálicos sobre la mesa de trabajo
- Conectar bien el enchufe de torsión de la alimentación principal
- No hacer contacto en borneras ni conexiones de equipos con la mano y/u objetos metálicos
- No colocar las manos ni objetos cerca de las bandas
- No acercarse a las bandas en movimientos
- Voltaje de alimentación máximo 220 VAC trifásico
- No cambiar señales de control ni de fuerza
- En caso de algún daño en la maqueta, primero desconecte todo (incluso alimentación principal) y luego verifique la novedad.

La explicación detallada de la maqueta y sus equipos se encuentra en los anexos (A, C, D, E, F); favor verificar frente a cualquier novedad.

CAPITULO 4

4. Comportamiento del Sistema frente a cambio de seteo y carga

4.1 Comportamiento del sistema frente a variaciones del seteo de voltaje

Hasta el momento hemos estudiado el comportamiento del sistema y su calibración para un cierto valor de seteo (6 VDC), en esta sección estudiaremos el comportamiento cuando se modifica el valor de trabajo de 6 a 8 VDC.

Variar el seteo dentro de nuestro sistema de control no es complicado, lo podemos realizar con el sistema en funcionamiento y con el sistema detenido. Para análisis realizaremos el cambio del valor con sistema detenido, lo único que se debe hacer es modificar el slide de voltaje que se ha tomado un diseño de barra, pasando el valor de 6 a 8, como se observa en la figura 4.1.1 y 4.1.2.

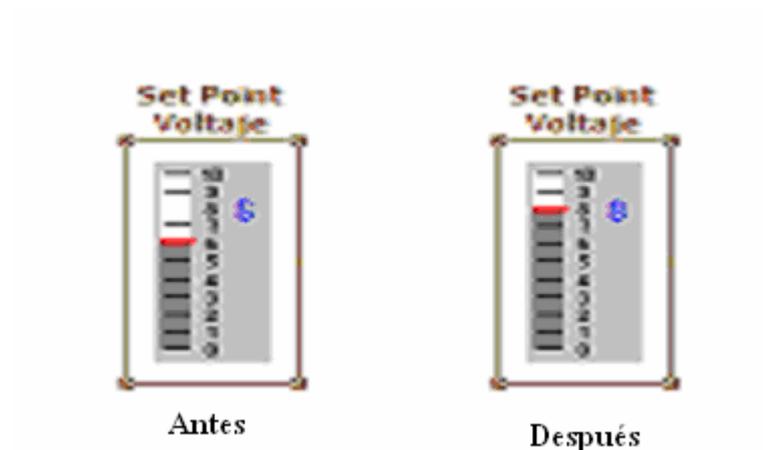


FIGURA 4.1.1 CAMBIO DEL VALOR DE SETEO

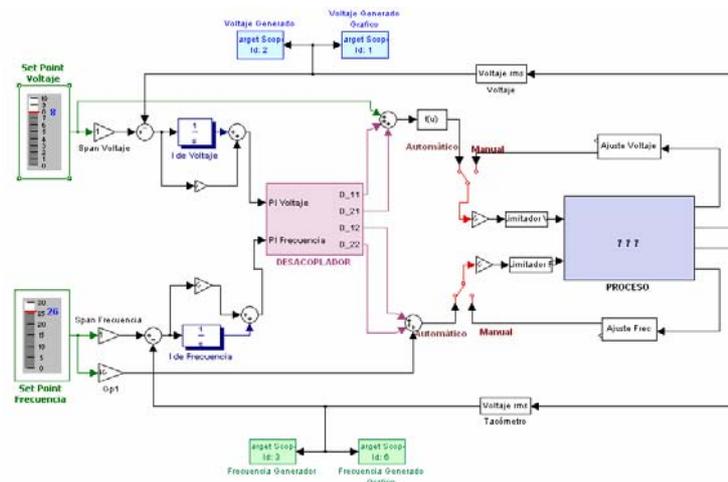


FIGURA 4.1.2 SISTEMA CON EL CAMBIO DEL SETEO

Al realizar esta variación, automáticamente el sistema comenzará a controlar el valor de voltaje en 8 VDC, como lo muestra la siguiente figura 4.1.3.

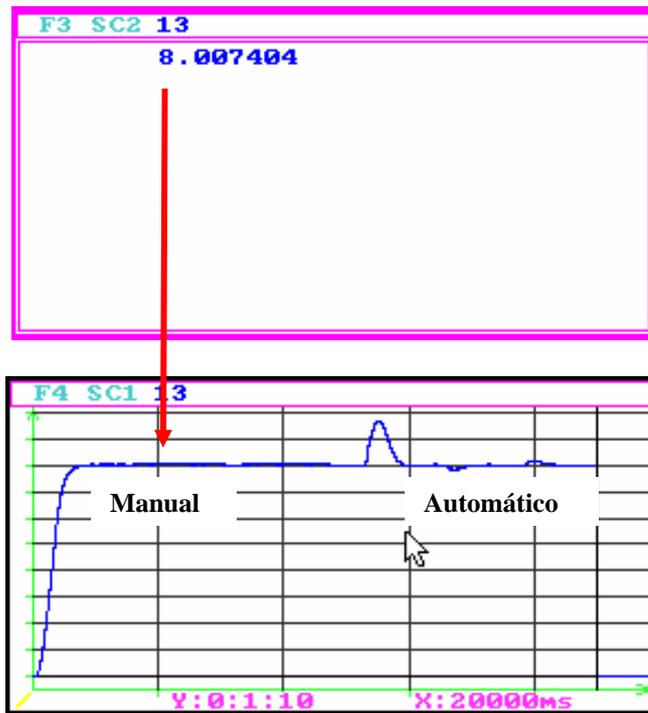


FIGURA 4.1.3 CURVA DE VOLTAJE A 8 VDC SE SETEO

Dado que no se ha realizado cambio en el valor de seteo de la frecuencia, en este variable el sistema mantiene el control a 26 Hz. Esto lo observamos en la figura 4.1.4.

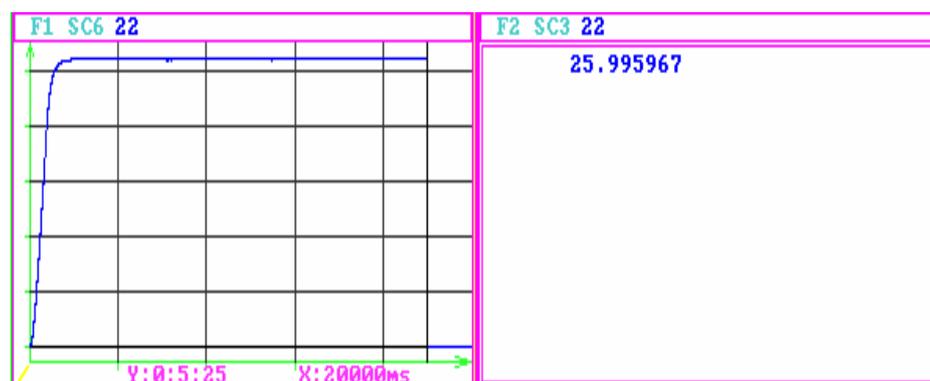


FIGURA 4.1.4 CURVA DE FRECUENCIA SIN VARIAR EL SETEO

Como se puede observar los valores al arrancar el sistema, son los valores con los cuales se han seteado las variables respectivas, ahora verificaremos el comportamiento del sistema con el nuevo valor de voltaje frente a perturbaciones externas. Las gráficas que hemos obtenido se encuentran en la figura 4.1.5.



FIGURA 4.1.5 CURVA DE VOLTAJE Y FRECUENCIA A 8 VDC FRENTE A PERTURBACIONES

El sistema frente a las perturbaciones (entrada y salida de la carga) logra estabilizarse manteniendo la estabilidad. Esta prueba nos permite indicar que nuestro sistema realiza el mismo

control para cualquier valor de seteo que se coloque, sea este de voltaje o frecuencia.

Esto va de la mano con los requerimientos de algunos procesos industriales donde se desee realizar cambio de valores de control, caso puntual un sistema de dosificación de materiales; donde la cantidad de dosificación dependerá del producto a realizar.

En el caso de generación de voltaje y frecuencia estos valores de seteo nunca se modifican, ya que los equipos de trabajo tienen una máxima tolerancia de variación de voltaje y frecuencia cuyo valor es mucho menor al 10 %. Las variaciones que existen son por causa de perturbaciones del sistema interconectado o por disminución en la capacidad de generación y en valores muy pequeños.

Por lo tanto, aunque nuestro sistema en la vida real no necesita realizar cambio de valores de seteo considerables, podemos concluir que MatLab y SIMULINK nos permite variar los valores a controlar sin que esto modifique los parámetros de estabilización.

4.2 Sobrecarga del Sistema

Una parte importante dentro de cualquier sistema es conocer sus limitaciones y por lo tanto su máximo rango de trabajo, este sistema no es la excepción.

La carga normal del sistema es un sistema de dos focos con una potencia aproximada de 8 W, lo cuál produce una caída de potencial aproximadamente de 0.22 VDC. Para realizar las pruebas de sobrecarga se ha incorporado un foco de 25 W con una caída de potencial aproximado de 1.5 VDC; las pruebas la realizamos con el valor de voltaje y frecuencia de trabajo, como se muestra en la figura 4.2.1.

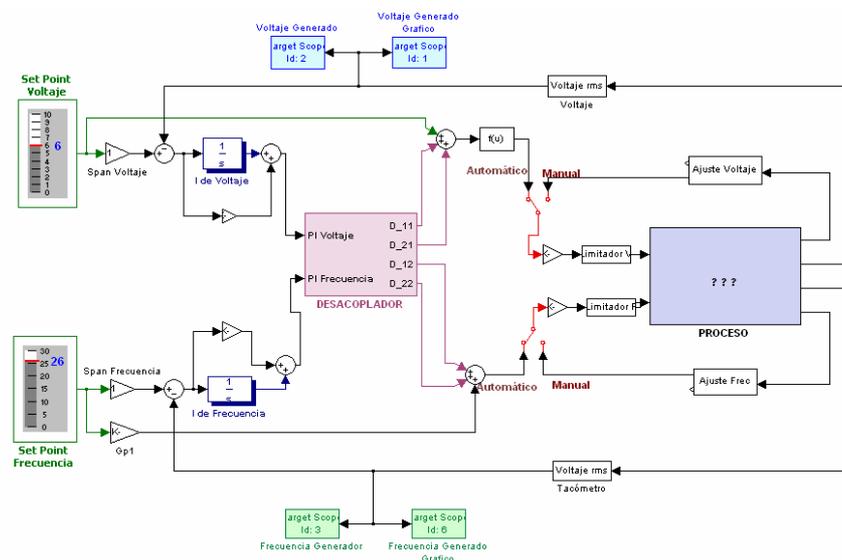


FIGURA 4.2.1 SISTEMA UTILIZADO PARA ANALISIS DE SOBRECARGA

Realizando el arranque antes explicado en el capítulo 3, llevamos al sistema de forma manual hasta el valor de trabajo y luego ingresamos el sistema en automático para que controle con los valores seteados, una vez que esté estable y en automático pulsamos la botonera de carga para ingresar la nueva carga, obteniendo los valores que se observan en la figura 4.2.2.

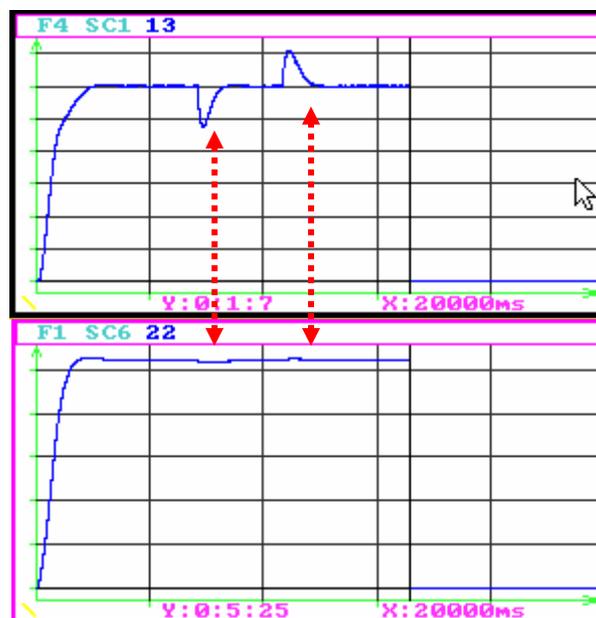


FIGURA 4.2.2 SEÑALES FRENTE A UNA CARGA DE MAYOR CONSUMO

Como podemos observar en las graficas de la figura 4.2.2 al ingresar la carga de mayor consumo, se produce una mayor perturbación en el sistema aumentando el sobre nivel porcentual y el tiempo de estabilización. El sistema de igual manera regresa a su valor de seteo indicado, logrando la estabilización de las señales.

La causa del aumento del nivel de sobre carga es que el delta de corriente de carga en este caso es mayor; esta es un simulación de lo que en el sistema real de generación ocurre. El delta de la corriente de carga no es controlado ni tampoco esperado, esta variable es aleatoria que depende de ingreso y salidas de fábricas, barrios, construcciones, etc., y cuya información de ingreso o salida no es indicada en línea al sistema de generación.

Nuestro sistema contempla este suceso, por lo cuál puede mantener el control de las variables frente a diferentes cargas. Pero también tiene limitaciones que son:

1. Que la carga no supere la potencia máxima que puede entregar nuestro sistema.
2. Que los deltas de perturbaciones no sean demasiado grandes.

Una vez que hemos observado por separado como se comporta nuestro sistema frente a cambio de niveles seteos y de potencia de carga, debemos conocer cuales son los valores máximos de trabajo.

Nuestro sistema permite manejar valores de voltajes superiores a 9 VDC, pero el circuito electrónico de regulación de señal no, esta limitación es causada por el diodo zener de 10 V que evita un ingreso de voltaje mayor a la tarjeta que lo pueda quemar. Esta protección de la tarjeta afecta al sistema ya que no podrá saber cuanto es el valor real de voltaje cuando este sea superior a 10 V; al no saber cuanto es el valor no podrá regular el sistema para mantener controlado los valores seteados.

Esta limitación causada por características de los equipos utilizados, puede ser eliminada modificando el circuito electrónico de adecuación de señales, logrando una nueva relación que permita que el sistema controle valores de seteos mayores a 10 VDC.

Por el momento nuestro sistema puede trabajar con un rango de voltaje desde 1 VDC a 9VDC, regulando las salida de forma satisfactorias y en frecuencia hasta 28 HZ, los valores de estabilización se encuentra dentro del rango de +/- 2%, valor tomado como referencia de las curvas teóricas de control clásico.

CAPITULO 5

5 MANUAL DE EXPERIMENTACION

5.1 Práctica 1: Análisis de estabilidad teórica

5.1.1 Objetivo

- Conocer como realizar una simulación con ayuda de SIMULINK de un sistema real.
- Saber interpretar las curvas obtenidas del sistema simulado conociendo sus diferencias.
- Obtener la función de transferencia teórica de un circuito de generación de voltaje y frecuencia; identificando el lazo cruzado.

5.1.2 Introducción y Teoría

El objetivo de nuestra práctica es conocer el comportamiento un sistema de generación de energía eléctrica, para ello necesitamos dos equipos principales (figura 5.1.2.1): el motor y el generador. El motor será el responsable de proporcionar la fuerza motriz del eje del generador que para nuestro caso utilizaremos un alternador de carro.

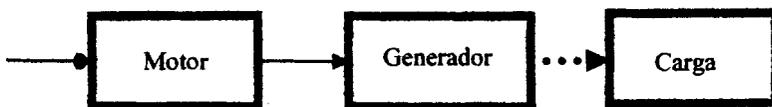


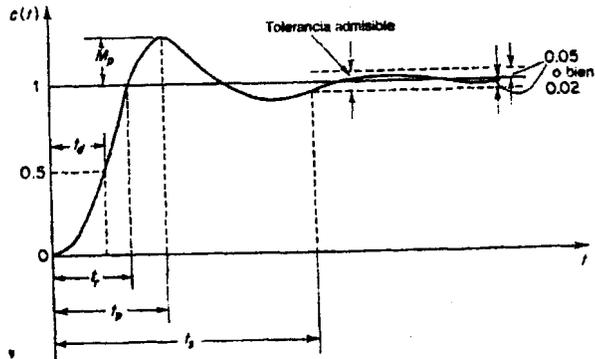
FIGURA 5.1.2.1 DIAGRAMA DE BLOQUE DEL SISTEMA

Acordémonos que la función de transferencia teórica se obtiene relacionando una salida del sistema con una entrada del sistema, como nuestro sistema tiene dos variables a controlar (voltaje y frecuencia generada), por medio de dos variables de control (velocidad de motor y voltaje de campo del generador), debemos tener cuatro

relaciones de variables y dos relaciones de perturbación que nos producirán seis curvas características que son:

1. Voltaje Generado Variando Velocidad
2. Frecuencia Generada Variando Velocidad
3. Voltaje Generado Variando Voltaje de Campo
4. Frecuencia Generada Variando Voltaje de Campo
5. Voltaje Generado Variando Perturbación (IL)
6. Frecuencia Generada Variando Perturbación (IL)

Cuando existe varias variables la mejor forma de identificar el comportamiento del sistema, es realizarla modificando una variable y manteniendo constante la otra. Así podremos obtener la curva característica entre ellas, dichas curvas serán observadas para determinar sus parámetros de control como son: tiempo de estabilización, tiempo de subida, estabilidad de la señal, sobre nivel porcentual, etc. como se muestra en la siguiente figura 5.1.2.2.



**FIGURA 5.1.2.2 CURVA Y PARAMETROS
CARACTERISTICOS EN FUNCION DEL TIEMPO**

Donde:

Td: Tiempo de retardo

Tr: Tiempo de crecimiento (time rise)

Tp: Tiempo pico (time settling)

Mp: Sobreimpulso máximo (over shoot)

Ts: Tiempo de estabilización, cuando los valores están + 5% / - 2 % del valor seteado

5.1.3 Pre-práctica

1. Encuentre la función de transferencia teórica de un motor de inducción DC, según el siguiente esquema de la figura 5.1.3.1:

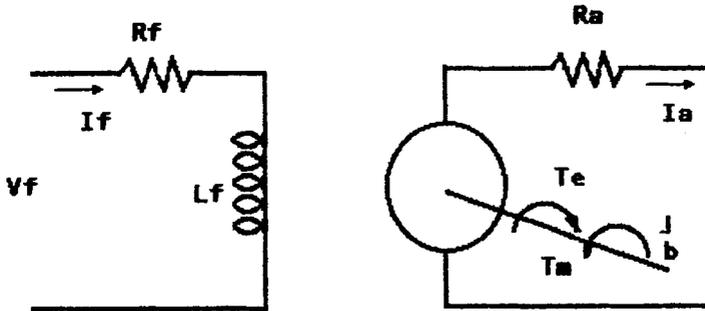


FIGURA 5.1.3.1 ESQUEMA DE UN MOTOR DC

Como motor tenemos que el torque en el eje es variable, y que el torque mecánico (T_m) es igual al torque eléctrico (T_e).

$$T_e = T_m \quad ; \quad \phi = K_f \cdot I_f$$

$$T_e = K_1 \cdot \phi \cdot I_a(t) ;$$

$$T_e = K_1 \cdot K_f \cdot I_f \cdot I_a(t) \text{ siendo } I_a \text{ constante entonces } K_m = K_1 \cdot K_f \cdot I_a(t)$$

$$T_e = K_m \cdot I_f$$

$$V_f = R_a \cdot I_f + L_f \cdot \frac{d(I_f)}{dt} \text{ (función tomando en cuenta los estados transitorios)}$$

$$V(s) = R_a \cdot I_f(s) + L_f \cdot s \cdot I_f(s)$$

$$V(s) = I_f(s) [R_a + s \cdot L_f] + V_c(s)$$

$$I_f(s) = V(s) - V_c(s) / [R_a + s.L_f]$$

$V_c(s) = K_c \cdot \omega_m(s)$ voltaje inducido por la fuerza contra electromotriz (Perturbación interna del motor)

$$T_e = K_m \cdot V(s) / [R_a + s.L_f]$$

$$T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + b \cdot \omega_m$$

$$T_m = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

$$T_m = J \theta(s) s^2 + b \theta(s) s$$

$$T_m = \theta_m(s) [J s^2 + b s]$$

$$K_m \cdot V(s) / [R_a + s.L_f] = \theta_m(s) [J s^2 + b s]$$

$$K_m / [R_a + s.L_f] [J s^2 + b s] = \theta_m(s) / V(s)$$

$$\underline{\theta_m(s) / V(s) = K_m / [R_a + s.L_f] [J s^2 + b s]}$$

Como este bloque incluye una etapa de amplificación de señal, que nos permitirá realizar ajuste de señal en el sistema real; la función de transferencia es:

$$\underline{V(s) / V_{in} = K_1}$$

La función de transferencia final del motor es (figura 5.1.3.2):

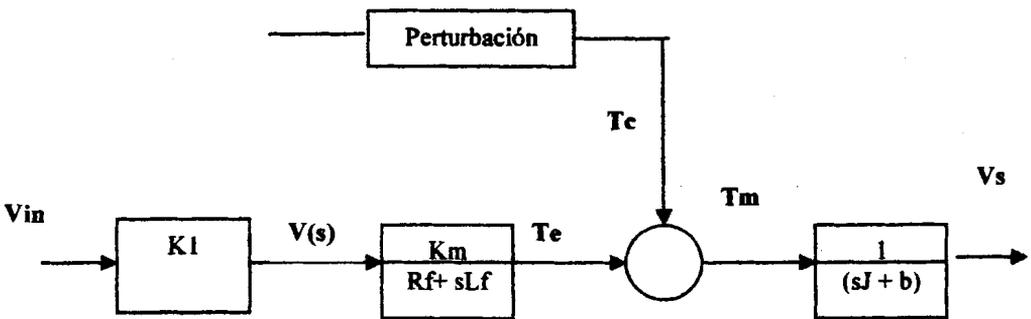


FIGURA 5.1.3.2 FUNCION DE TRANSFERENCIA DE
UN MOTOR DC

2. Encuentre la función de transferencia de un generador DC con excitación separada como se muestra en la figura 5.1.3.3.

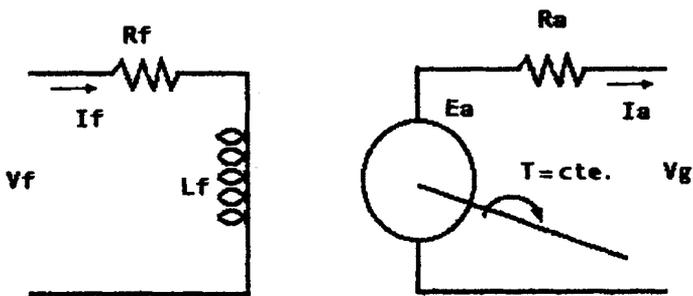


FIGURA 5.1.3.3 ESQUEMA DE UN GENERADOR DC

En el diagrama de bloque del generador se presentan condiciones de trabajo que son: velocidad de entrada constante y voltaje de campo constante.

$$E_a = K \phi W_g$$

$$\phi = B \cdot d \cdot l$$

$$E_a = K [u \cdot d \cdot l \cdot k] i_f$$

$$W_g$$

$$B = u \cdot H$$

$$E_a = K' i_f \cdot W_g$$

$$H = K \cdot i_f$$

$$i_f = V_f / [R_f + s L_f]$$

$$E_a = K' [V_f / (R_f + s L_f)] \cdot W_g$$

Velocidad Constante:

Donde $W_g = W_m = \text{cte.}$ entonces $K'' = K' \cdot W_g$

$$E_a / V_f = K' \cdot W_g / (R_f + s L_f)$$

$$E_a / V_f = K'' / (R_f + s L_f)$$

Voltaje de Campo Constante:

Donde $V_f = \text{cte.}$ entonces $K''' = K' \cdot V_f$

$$E_a / W_g = K' \cdot V_f / (R_f + sL_f)$$

$$E_a / W_g = K''' / (R_f + sL_f)$$

$$V_g = E_a - V_c$$

$$V_g = E_a - \textcircled{I_a \cdot R_a} \longrightarrow \text{Perturbación interna del Generador}$$

En el generador existe dos variables a controlar, la primera antes vista es el voltaje generado que tiene dos condiciones, voltaje de campo constante y velocidad constantes. La segunda variable a controlar es la frecuencia de salida que depende directamente de la velocidad de entrada, cuya función de transferencia de muestra a continuación

$$F_{eg} = W_g \cdot P / 120 \quad (P = \text{números de polos del generador})$$

$$F_{eg} / W_g = P / 120$$

La función de transferencia del generador es (figura 5.1.3.4):

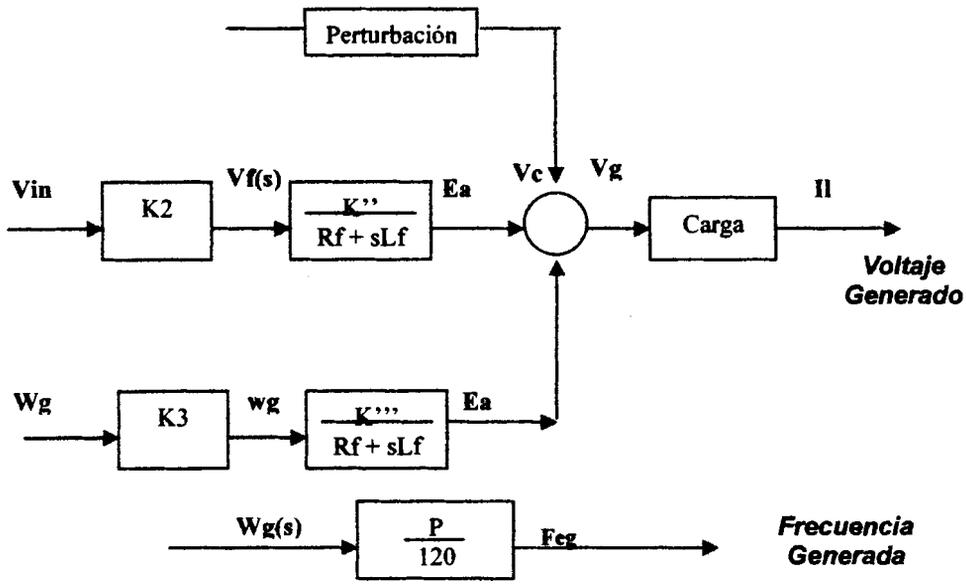


FIGURA 5.1.3.4 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL GENERADOR

3. Obtenga de forma teórica las funciones de transferencia de las perturbaciones del motor y generador, tomando como premisa que esta perturbación es causada por la corriente de carga del generador.

La perturbación del motor (figura 5.1.3.5) es causada por el torque inducido por el voltaje contra electromotriz, el cuál

está en función de la corriente de carga producida en el generador.

$$T_c = K_1 \cdot \phi \cdot i_L(t) \qquad \phi = K_f \cdot i_f$$

$$T_c = K_1 \cdot K_f \cdot i_f \cdot i_L(t) \qquad \text{como } i_f = \text{const.}$$

$$\text{Entonces } K_c' = K_1 \cdot K_f \cdot i_f$$

$$T_c = K_c' \cdot i_L(t) \qquad T_c / i_L(s) = K_c'$$

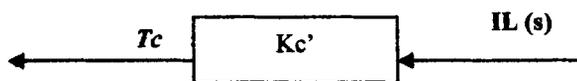


FIGURA 5.1.3.5 FUNCION DE TRANSFERENCIA
PERTURBACION DEL MOTOR

La perturbación del generador (figura 5.1.3.6) es causada por el voltaje contra electromotriz generado por la corriente de la carga.

$$V_g = E_a - V_c \qquad V_c = i_a \cdot R_a$$

$$V_g = E_a - i_a \cdot R_a \longrightarrow \text{Perturbación interna del Generador}$$

$$V_c / i_a = R_a \qquad \text{como } i_a = i_L \text{ entonces:}$$

$$V_c / i_L = R_a$$

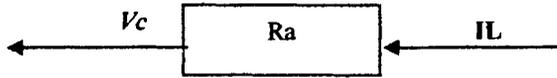


FIGURA 5.1.3.6 FUNCION DE TRANSFERENCIA DE
PERTURBACION DEL GENERADOR

4. Con la funciones de transferencia antes obtenida, unificar todo el sistema obteniendo una forma de sistema de dos variables:

$$Vg = f (Vc, Vin) \quad = \quad K1 Vc + K2 Vin$$

$$Fg = f (Vc, Vin) \quad = \quad K3 Vc + K4 Vin$$

Para poder identificar mejor el sistema, unificaremos los gráficos mostrando mejor las variables a controlar y sus relaciones entre ellas (figura 5.1.3.7):

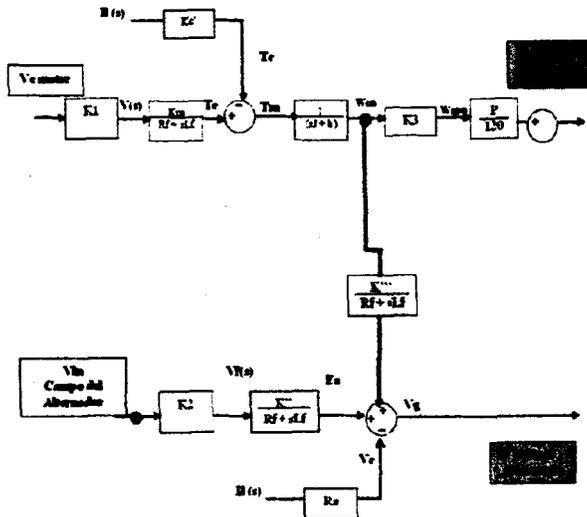


FIGURA 5.1.3.7 SISTEMA A CONTROLAR

Para poder obtener las funciones de transferencia entre las variables de control y las variables controladas, de la siguiente manera:

$$V_g = f(V_c, V_{in}) = K_1 V_c + K_2 V_{in}$$

$$F_g = f(V_c, V_{in}) = K_3 V_c + K_4 V_{in}$$

Debemos modificar el gráfico buscando las relaciones entre variables deseadas como se muestra a continuación (figura 5.1.3.8):

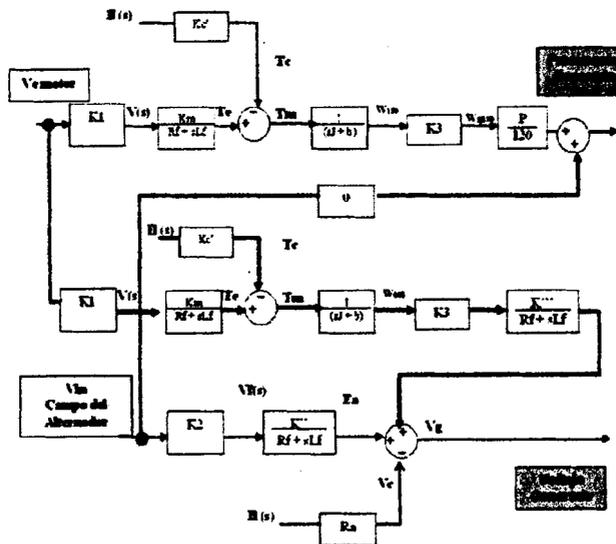


FIGURA 5.1.3.8 SISTEMA A CONTROLAR (LAZO CRUZADO)

5.1.4 Práctica

5.1.4.1 Materiales:

- Computador (Sistema de Control MatLab)

5.1.4.2 Parámetro de equipos a utilizar

Para poder realizar un trabajo didáctico se ha decidido utilizar los siguientes parámetros reales de cada equipo (figura 5.1.4.2.1):

MOTOR:	<p>Motor DC con los siguientes parámetros:</p> <p>Km: 10 N.m/Amp</p> <p>Ra: 50.0359 ohm</p> <p>LF: 6.21 H</p> <p>J: 2 N.m.s²/rad</p> <p>b: 5 N.m.s</p>
GENERADOR:	<p>Alternador de carro con regulador de voltaje externo:</p> <p>K'': K' .Wg = 2</p> <p>Rf: 4 ohm</p> <p>Lf: 0.03 H</p> <p>K''': K' . Vf =0.01</p> <p>P: 2</p>
CARGA:	<p>3 Focos en paralelo de carro de 12 V -</p> <p>0.83 Amps</p> <p>RL: 4.8 ohm</p>
CONSTANTES DE RELACIONES Y	<p>K1: 350.4 (Amplificación de voltaje generado)</p>

AMPLIFICACIONES	<p>K2: 1 (Amplificación voltaje de campo)</p> <p>K3: 1.0447 (Relación de poleas)</p>
-----------------	--

FIGURA 5.1.4.2.1 TABLAS DE PARAMETROS DE LA PRACTICA

5.1.4.3 Pasos de Instalación del sistema

1. En el computador abra el programa de MATLAB y busque dentro de las carpeta de prácticas el programa de SistemTeórica (figura 5.1.4.3.1):

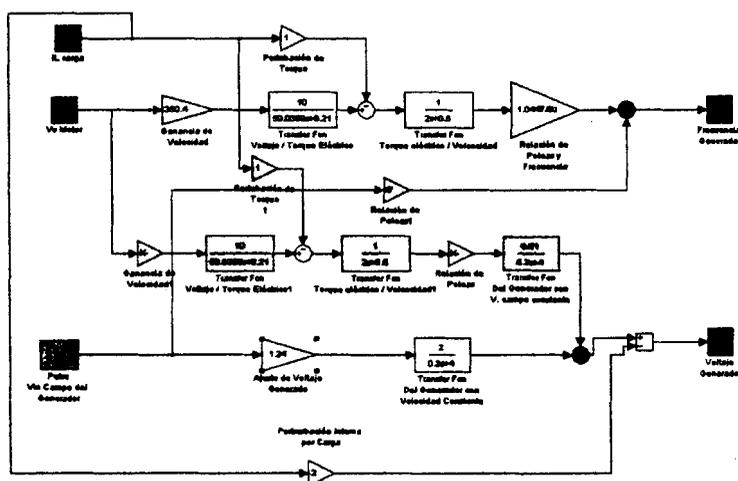


FIGURA 5.1.4.3.1 PROGRAMA SistemTeórica

2. Manteniendo el tren de pulso en la variable de control que desee que modificar y la otras variable en cero, observar la curva característica de voltaje y frecuencia obtenida M_p y T_s .

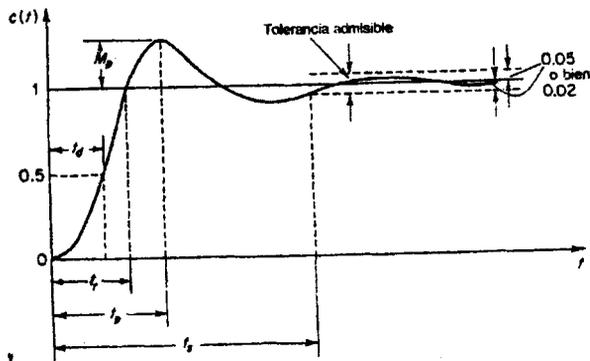


FIGURA 5.1.4.3.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE UN SISTEMA DE CONTROL

Donde:

M_p : Sobreimpulso máximo (over shoot)

T_s : Tiempo de estabilización, cuando los valores están + 5% / - 2 % del valor seteado

3. Repetir los pasos 2 y 3 para todas las relaciones de variables que son:
1. Voltaje Generado Variando Velocidad
 2. Frecuencia Generada Variando Velocidad

3. Voltaje Generado Variando Voltaje de Campo
4. Frecuencia Generada Variando Voltaje de Campo
5. Voltaje Generado Variando Perturbación (IL)
6. Frecuencia Generada Variando Perturbación (IL)

5.1.4.3.1 Voltaje Generado variando Velocidad

Para poder obtener esta relación mantenemos el voltaje de campo y la perturbación en valor cero, produciendo un tren de pulso unitario en la variable de control de la velocidad, como se muestra en la figura 5.1.4.3.1.1:

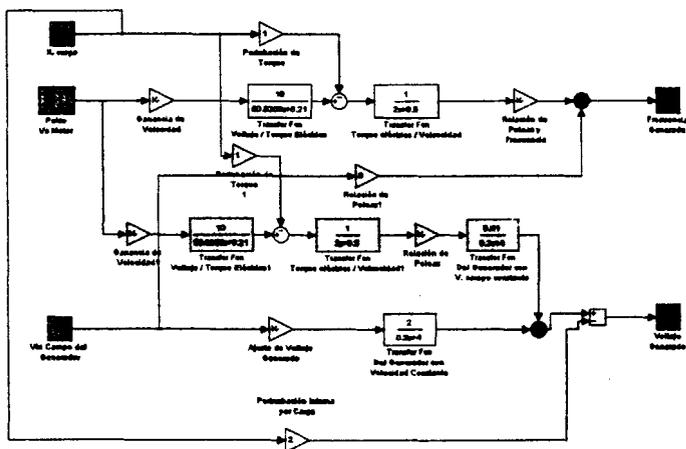


FIGURA 5.1.4.3.1.1 SISTEMA TEORICO VARIANDO VELOCIDAD

De este sistema obtenemos las siguiente gráfica (figura 5.1.4.3.1.2)

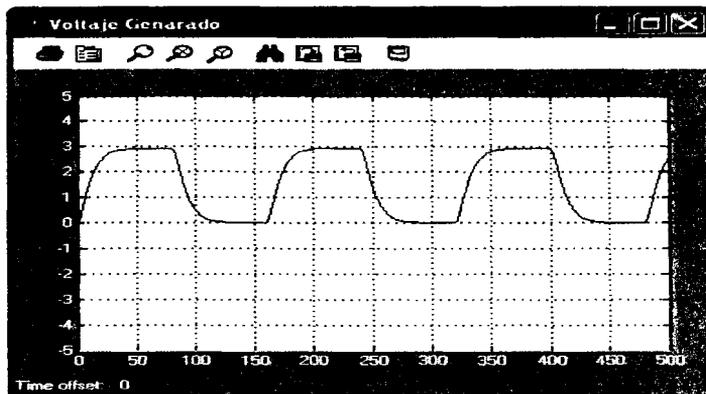


FIGURA 5.1.4.3.1.2 SEÑAL DE VOLTAJE

Lo que podemos deducir de esta grafica es que la variable de voltaje generado es directamente proporcional a la variable de control de velocidad, es decir que mientras mayor velocidad tenga el motor mayor será el voltaje generado.

Esta curva es de carácter de segundo grado con un tiempo de subida de 20 seg. aproximadamente y un tiempo de estabilización de 50 seg., con una estabilidad perenne frente al tren de pulso de variaciones colocada.

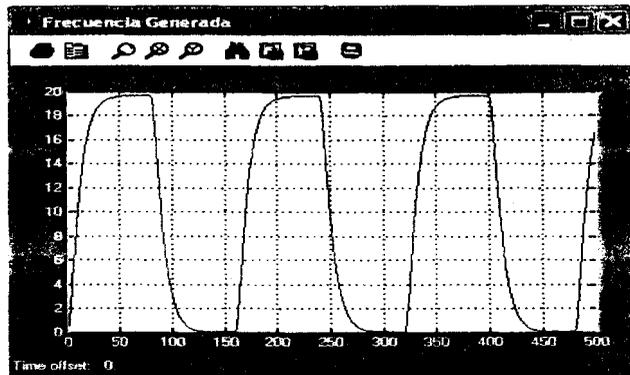


FIGURA 5.1.4.3.2.2 SEÑAL DE FRECUENCIA

Lo que podemos deducir de esta grafica es que la variable de frecuencia generada igual que el voltaje generado es directamente proporcional a la variable de control de velocidad, es decir que mientras mayor velocidad tenga el motor mayor será la frecuencia generada.

Esta curva también es de carácter de segundo grado con un tiempo de subida de 25 seg. aproximadamente y un tiempo de estabilización de 60 seg., con una estabilidad perenne frente al tren de pulso de variaciones colocada.



FIGURA 5.1.4.3.3.2 SEÑAL DE VOLTAJE

Lo que podemos deducir de esta grafica es que la variable de voltaje generado es directamente proporcional a la variable de control de voltaje de campo, es decir que mientras mayor voltaje de campo exista mayor será el voltaje generado.

Esta curva también es de carácter de primer grado con un tiempo de subida muy pequeño (0.18 seg), tanto que podemos decir que es instantánea la reacción de esta variable y un tiempo de estabilización igualmente muy rapita (0.22 seg), con una estabilidad perenne frente al tren de pulso de variaciones colocada.

De esto deducimos que el voltaje generado varía más rápido con la variable de control de voltaje de campo que con la de velocidad; esto se debe a que las variables eléctricas (voltaje de campo) tienen un menor tiempo de reacción que las variables mecánicas (velocidad)

5.1.4.3.4 Frecuencia Generada variando Voltaje de Campo

Para poder obtener esta relación mantenemos la velocidad y la perturbación en valor cero, produciendo un tren de pulso unitario en la variable de control de voltaje de campo, como se muestra en la figura 5.1.4.3.4.1:

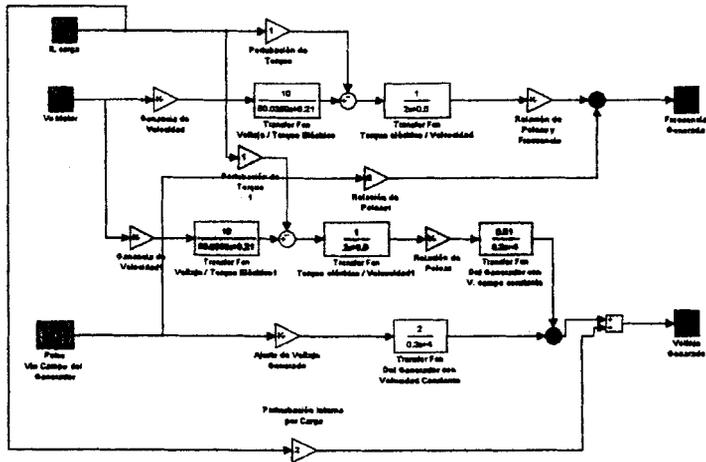


FIGURA 5.1.4.3.4.1 SISTEMA TEORICO VARIANDO VOLTAJE DE CAMPO

De este sistema obtenemos las siguiente gráfica (figura 5.1.4.3.4.2)

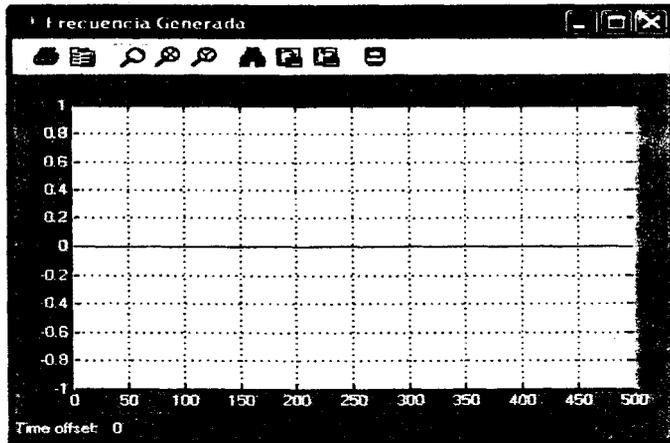


FIGURA 5.1.4.3.4.2 SEÑAL DE FRECUENCIA

Lo que podemos deducir de esta grafica es que la variable de frecuencia generada no es afectada por la variable de control de voltaje de campo, por lo tanto la frecuencia generada del sistema sólo depende de la variable de control velocidad.

5.1.4.3.5 Voltaje Generado variando Perturbación (IL)

Para poder obtener esta relación mantenemos la velocidad y el voltaje de campo en valor cero, produciendo un tren de pulso unitario en la perturbación (corriente de carga I_L), como se muestra en la figura 5.1.4.3.5.1:

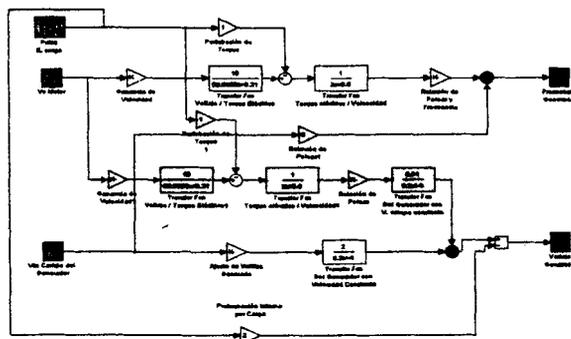


FIGURA 5.1.4.3.5.1 SISTEMA TEORICO VARIANDO PERTURBACION (IL)

De este sistema obtenemos la siguiente gráfica (figura 5.1.4.3.5.2):

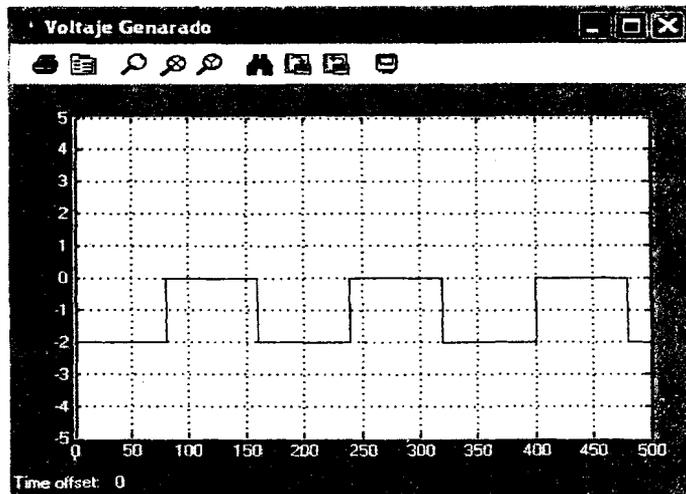


FIGURA 5.1.4.3.5.2 SEÑAL DE VOLTAJE

Lo que podemos deducir de esta grafica es que la variable de voltaje generado es indirectamente proporcional a la perturbación (I_L), es decir que mientras mayor corriente de carga exista menor será el voltaje generado; esto es porque el voltaje generado en los bornes del generador (V_g) es igual al voltaje generado interno (E_a) menos la caída de potencia causado en la impedancia de salida del generador multiplicada por la corriente de carga ($I_L \cdot R_a$)

Esta curva tiene un tiempo de subida muy pequeño (0.2 seg), tanto que podemos decir que es instantánea la reacción de esta variable y un tiempo de estabilización igualmente muy rápida (0.2seg), con una estabilidad perenne frente al tren de pulso de variaciones colocada.

De esto deducimos que el aumento de la corriente de carga afecta considerablemente al voltaje generado en magnitudes elevadas, por lo tanto nuestro sistema deberá reaccionar de forma rápida para evitar que la perturbación de corriente afecte al voltaje generado considerablemente.

5.1.4.3.6 Frecuencia Generada variando Perturbación (IL)

Para poder obtener esta relación mantenemos la velocidad y el voltaje de campo en valor cero, produciendo un tren de pulso unitario en la

perturbación (corriente de carga I_L), como se muestra en la figura 5.1.4.3.6.1:

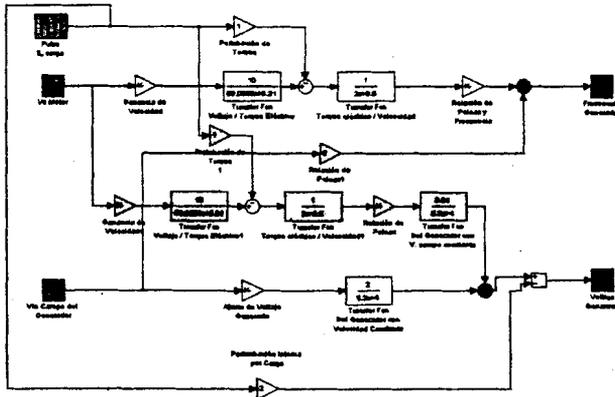


FIGURA 5.1.4.3.6.1 SISTEMA TEORICO VARIANDO PERTURBACION (IL)

De este sistema obtenemos las siguiente gráfica (figura 5.1.4.3.6.2)

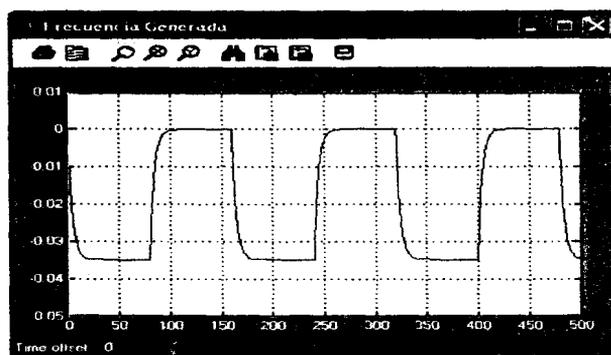


FIGURA 5.1.4.3.6.2 SEÑAL DE FRECUENCIA

Lo que podemos deducir de esta grafica es que la variable de frecuencia generada es indirectamente proporcional a la perturbación (IL) al igual que el voltaje generado, es decir que mientras mayor corriente de carga exista menor será la frecuencia generada; esto es causado por la fuerza contra electromotriz producida en el generador por presencia de la corriente de carga, que genera un torque en sentido contrario a la fuerza motriz primaria (motor)

Esta curva tiene un tiempo de subida de (20 seg), y un tiempo de estabilización de (25 seg), con una estabilidad perenne frente al tren de pulso de variación colocada.

Lo que debemos observar es que la magnitud de la perturbación es muy pequeña, de valores alrededor de 0.035 (unidades). Por lo tanto la perturbación de

la corriente de carga afecta más al voltaje generado que a la velocidad, la variable velocidad será afectada frente a perturbaciones de corrientes muy elevadas; que si pueden ocurrir en el mercado eléctrico mayorista que manejan carga muy considerable como son las ciudades

5.1.4.4 Datos a obtener

Tiempo de estabilización y sobre nivel porcentual obtenido

Relación	Tiempo de Subida (seg)	Tiempo de Estabilización (seg)	Sobre Nivel porcentual (%)
Voltaje Generado Variando velocidad	20	50	0
Frecuencia Generada Variando Velocidad	25	60	0
Voltaje Generado Variando Voltaje de	0.18	0.22	0

Campo			
Frecuencia Generada Variando Voltaje de Campo	NA	NA	NA
Voltaje Generado Variando Perturbación (IL)	0.2	0.2	0
Frecuencia Generada Variando Perturbación (IL)	20	25	0

FIGURA 5.1.4.4.1 TABLA DE DATOS OBTENIDO

5.1.5 Conclusiones y Recomendaciones

Dados estos análisis nos damos cuenta que la generación de voltaje y frecuencia son estables, variando cualquiera de las dos variables de control. Que la variable de velocidad del motor afecta tanto al voltaje generado como a la frecuencia generada, y que la variable de voltaje de campo del generador sólo afecta al voltaje generado de manera

instantánea. Que la perturbación afecta indirectamente a la frecuencia generada y al voltaje generado, siendo este último más afectado en magnitud y tiempo.

5.2 Práctica 2: Desacopladores del sistema

5.2.1 Objetivo

- Conocer lo que es un Sistema de variables múltiples.
- Conocer la técnicas con lo cual podemos eliminar los lazos cruzados.
- Obtener los desacopladores para un sistema 2 x 2.

5.2.2 Teoría, Control de Procesos Multivariables

A menudo encontramos procesos en los cuales más de una variable debe ser controlada, ese es el objetivo del control múltiple. En algunos procesos, se puede considerar cada control de variable separado de las otras cuando no interactúan entre ellas. Este sistema se refiere como *sistema*

de control multivariable o como sistema de control *múltiple-entrada, múltiple-salida (MIMO)*. El problema que se va a manejar es el *lazo de interacción*. Se debe encontrar la respuesta y estabilidad del sistema multivariable

5.2.2.1 Selección de variables controladas y manipuladas

Cuando usamos la medida de interacción para seleccionar el par de variables controladas y manipuladas para minimizar el efecto de interacción. Considere el sistema de la figura 5.2.2.1.1 con dos variables a controlar, c_1 y c_2 , y dos variables manipuladas, m_1 y m_2 . Se llama a este sistema un sistema 2 x 2. Por lo que se coloca en pares cada variable controlada con la variable manipulada que tiene más "influencia" en ella. En este contexto, *influencia* y *ganancia* tiene el mismo significado; para tomar una decisión, se deben encontrar la ganancia de cada variable manipulada en cada variable controlada.

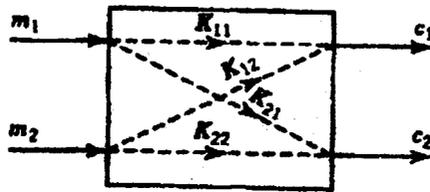


FIGURA 5.2.2.1.1 ESQUEMA GENERAL DE UN PROCESO
2 X 2.

5.2.2.2 Ganancias lazo abierto

Las cuatro ganancias de estado estacionario de circuito abierto para un sistema 2 x 2 son:

$$K_{11} = \left. \frac{\Delta c_1}{\Delta m_1} \right|_{m_2} \quad K_{12} = \left. \frac{\Delta c_1}{\Delta m_2} \right|_{m_1}$$

$$K_{21} = \left. \frac{\Delta c_2}{\Delta m_1} \right|_{m_2} \quad K_{22} = \left. \frac{\Delta c_2}{\Delta m_2} \right|_{m_1}$$

Donde K_{ij} es la ganancia relativa de i variable controlada para j variable manipulada. La barra vertical indica que las ganancias son determinadas con los lazos abiertos; esto es, el cambio es hecho en cada variable manipulada mientras la otra variable manipulada permanece constante.

Puede aparecer que las variables controladas y manipuladas podrían ser colocada en pares simplemente comparando las ganancias de lazo abierto. Por ejemplo, si K_{12} fuese mayor en magnitud que K_{11} , entonces m_2 sería escogida para controlar c_1 . Esto no es absolutamente correcto, sin embargo, debido a que las ganancias tienen diversas unidades y no pueden generalmente ser comparadas unas con otras.

La Matriz de Ganancia de Estado Estacionario, (MGEE), es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \end{bmatrix}$$

En la figura 5.2.2.2.1 se muestra el sistema correspondiente.

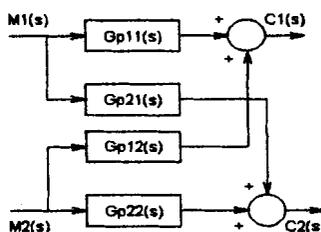


FIGURA 5.2.2.2.1: SISTEMA 2 X 2

Por el método de Bristol obtenemos la matriz de ganancias relativas, (MGR).

$$\mu_{11} = \frac{\partial c_1 / \partial m_1 \Big|_{m_2}}{\partial c_1 / \partial m_1 \Big|_{c_2}} \approx \frac{\Delta c_1 / \Delta m_1 \Big|_{m_2}}{\Delta c_1 / \Delta m_1 \Big|_{c_2}} = \frac{K_{11}}{K'_{11}}$$

En forma general, elementos sin dimensiones, tenemos los siguientes:

$$\begin{bmatrix} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} \\ \mu_{21} & \mu_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \end{bmatrix} \quad \mu_{ij} = \frac{\partial c_i / \partial m_j \Big|_m}{\partial c_i / \partial m_j \Big|_c} = \frac{K_{ij}}{K'_{ij}}$$

El numerador es la ganancia de lazo abierto K_{ij} con todas las demás variables manipuladas mantenidas constante. El denominador es la ganancia de lazo cerrado K'_{ij} con todas las demás variables controladas mantenidas constantes, $D_{c2}=0$.

5.2.2.3 Método de Bristol, Matriz de Ganancia Relativa (MGR)

Para calcular la ganancia de lazo cerrado para el par c_1 - m_1 , se debe introducir la realimentación de c_2 mediante un controlador para generar m_2 . Si este es un controlador con modo integral, cuando ocurra un cambio en m_1 éste ajustará m_2 para lograr que c_2 se haga cero, en la figura 5.2.2.3.1 se muestra el diagrama.

$$\begin{vmatrix} \Delta C_1 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \end{vmatrix}$$

$$\Delta m_2 = -\frac{K_{21}}{K_{22}} \Delta m_1$$

$$\Delta C_1 = K_{11} \Delta m_1 - K_{12} \frac{K_{21}}{K_{22}} \Delta m_1$$

$$K'_{11} = \frac{\Delta C_1}{\Delta m_1} = K_{11} - K_{12} \frac{K_{21}}{K_{22}}$$

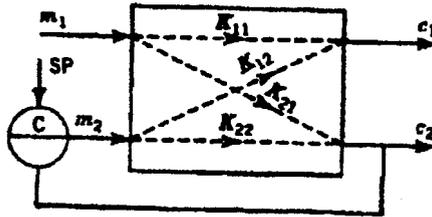


FIGURA 5.2.2.3.1 SISTEMA A LAZO CERRADO

La matriz de ganancia relativa es la siguiente:

$$\begin{vmatrix} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}} & \frac{K_{12}K_{21}}{K_{21}K_{12} - K_{11}K_{22}} \\ \frac{K_{21}K_{12}}{21K_{12} - K_{11}K_{22}} & \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \end{vmatrix}$$

Para cualquier sistema $n \times n$, un elemento de la MGR, se calcula la transpuesta de la inversa de la matriz de ganancia de estado estacionario K y se multiplica cada término de la nueva matriz por el término correspondiente en la matriz original. Los términos que se obtienen son los de la matriz de interacción o matriz de ganancia relativa.

$$B = K^{-1}$$
$$\mu_{ij} = B_{ji} K_{ij}$$

5.2.2.4 Regla para aparear las variables controladas y manipuladas

“Siempre se agrupan por pares los elementos positivos de la MGR más cercanos a 1. La estabilidad de los pares se verifica mediante el teorema de Niederlinski; si el par da origen a un sistema inestable, entonces se elige otro par positivo con valores cercanos a 1, siempre que sea posible, se evitará la agrupación por pares negativos”.

Teorema de Niderlinski, se parte de suponer que los pares propuestos son elementos de la diagonal en la MGEE. El sistema de circuito cerrado que resulta de agrupar por pares m_1-c_1 , m_2-c_2 , ... m_n-c_n , es inestable si y solo si:

$$\frac{|MGEE|}{\prod_{i=1}^n K_{ij}} < 0$$

- **Indice de Interacción.**

Según Nisenfeld y Shultz para un sistema multivariable, en donde el Índice de Interacción debe ser menor a 1 para evitar la inestabilidad debida a la interacción de los circuitos. Se utiliza la variable manipulada m_j para controlar la variable c_i .

$$I_{ij} = \left| \frac{1 - \mu_{ij}}{\mu_{ij}} \right|$$

- **Desacoplamiento.**

Si se fijan los valores de $D_{11}(s)$ y $D_{22}(s)$ igual a 1, entonces:

$$C_1(s) = [D_{12}(s)G_{p11}(s) + G_{p12}(s)]M_2(s)$$

$$C_2(s) = [D_{21}(s)G_{p22}(s) + G_{p21}(s)]M_1(s)$$

Si las variables controladas tienen que permanecer constantes, sus variables de desviación deben ser cero.

$$0 = [D_{12}(s)G_{p11}(s) + G_{p12}(s)]M_2(s)$$

$$0 = [D_{21}(s)G_{p22}(s) + G_{p21}(s)]M_1(s)$$

El desacoplador queda de la siguiente manera:

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{p12}(s)}{G_{p11}(s)} \quad D_{21}(s) = -\frac{G_{p21}(s)}{G_{p22}(s)}$$

5.2.3 Práctica

1. En MatLab abra el archivo `lazo_abierto`, el cual se muestra en la figura 5.2.3.1 con el cual se van a tomar los datos para las variable controlada y manipuladas del sistema a lazo abierto. Llene la tabla 5.2.3.2 que se muestra a continuación.

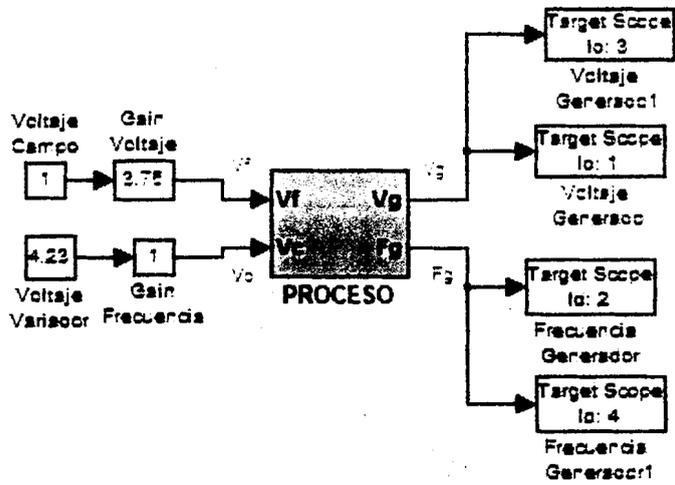


FIGURA 5.2.3.1 SISTEMA A LAZO ABIERTO

Vc	Vg	Fg
Voltaje de campo	Voltaje generado	FREC. Del generador
1.8	0.01	30
2	0.47	30
2.25	1.47	30
2.5	2.48	30
2.75	3.73	30
3	5.42	30
3.25	6.68	30
3.5	7.75	30

4	9.92	30
4.25	10.01	30

$t_s - V_v = 5.5$

Vv	Fg	Vg
Voltaje variador	FREC. generador	Voltaje generado
0	0	0
0.5	1.75	0
1	4.48	0.03
1.5	7.37	0.55
2	10.25	1.25
2.5	13.17	1.99
3	16.10	2.7
3.5	18.98	3.8
4	21.88	4.6
4.5	24.78	5.4
5	27.70	6.2
5.5	30.32	6.9

$t_s - V_c = 3.5$

FIGURA 5.2.3.2 TABLA DE DATOS

2. Con los datos obtenidos anteriormente, calcule la MGEE (Matriz de Ganancia de Estado Estacionario).

- Ganancias de estado estacionario del circuito abierto.

$$K11 = \frac{\Delta Vg}{\Delta Vc} \Big|_{v_v} \quad K12 = \frac{\Delta Vg}{\Delta Vv} \Big|_{v_c} \quad K21 = \frac{\Delta Fg}{\Delta Vc} \Big|_{v_v} \quad K22 = \frac{\Delta Fg}{\Delta Vv} \Big|_{v_c}$$

MGEE

$$\begin{bmatrix} \Delta Vg \\ \Delta Fg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K11 & K12 \\ K21 & K22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Vc \\ \Delta Vv \end{bmatrix}$$

$$K11 = \frac{9.92 - 0.47}{4 - 2} = 4.7$$

$$K12 = \frac{6.9 - 0.55}{5.5 - 1.5} = 1.59$$

$$K21 = \frac{30 - 30}{2.75 - 2.5} = 0$$

$$K22 = \frac{13.17 - 10.25}{2.5 - 2} = 5.84$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Vg \\ \Delta Fg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.7 & 1.61 \\ 0 & 5.84 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Vc \\ \Delta Vv \end{bmatrix}$$

3. Halla la matriz de ganancia relativa (MGR) del sistema en lazo cerrado y seleccione los pares de variables controladas y manipuladas

- Ganancias de estado estacionario del sistema a lazo cerrado.

$$K'_{11} = \left. \frac{\Delta Vg}{\Delta Vc} \right|_{Fg} \quad K'_{12} = \left. \frac{\Delta Vg}{\Delta Vv} \right|_{Fg} \quad K'_{12} = \left. \frac{\Delta Fg}{\Delta Vc} \right|_{Vg}$$

$$K'_{22} = \left. \frac{\Delta Fg}{\Delta Vv} \right|_{Vg}$$

$$\mu_{ij} = \frac{\left. \frac{\partial c_i}{\partial m_j} \right|_m}{\left. \frac{\partial c_i}{\partial m_j} \right|_c} = \frac{K_{ij}}{K'_{ij}}$$

MGR

$$\begin{vmatrix} \Delta Vg \\ \Delta Fg \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} \\ \mu_{21} & \mu_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta Vc \\ \Delta Vv \end{vmatrix}$$

Utilizando el método de Bristol obtenemos los valores para

$$K'_{ij}$$

$$\Delta Vg = K_{11}\Delta Vc + K_{12}\Delta Vv$$

$$\Delta Fg = K_{21}\Delta Vc + K_{22}\Delta Vv \Rightarrow \Delta Fg = K_{21}\Delta Vc + K_{22}\Delta Vv = 0$$

$$\Delta Vv = -\frac{K_{21}}{K_{22}}\Delta Vc$$

$$\Delta Vg = K_{11}\Delta Vc - K_{12}\frac{K_{21}}{K_{22}}\Delta Vc$$

$$K'_{11} = \left. \frac{\Delta Vg}{\Delta Vc} \right|_{Fg} \Rightarrow K'_{11} = K_{11} - K_{12}\frac{K_{21}}{K_{22}}$$

$$K'_{11} = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{K_{22}} \quad K'_{12} = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{-K_{21}}$$

$$K'_{21} = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{-K_{12}} \quad K'_{22} = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{K_{11}}$$

Las ganancias relativas μ_{ij} se la obtiene por definición, la

MGR es la siguiente:

$$\left| \frac{\Delta Vg}{\Delta Fg} \right| = \begin{vmatrix} \frac{k_{11}k_{22}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} & -\frac{k_{12}k_{21}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} \\ -\frac{k_{12}k_{21}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} & \frac{k_{11}k_{22}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta Vc \\ \Delta Vv \end{vmatrix}$$

$$\mu_{11} = \frac{4.7(5.84)}{4.7(5.84) - 1.61(0)} = 1$$

$$\mu_{12} = -\frac{1.61(0)}{4.7(5.84) - 1.61(0)} = 0$$

$$\mu_{21} = -\frac{1.61(0)}{4.7(5.84) - 1.61(0)} = 0$$

$$\mu_{22} = \frac{4.7(5.84)}{4.7(5.84) - 1.61(0)} = 1$$

MGR

$$\left| \frac{\Delta Vg}{\Delta Fg} \right| = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta Vc \\ \Delta Vv \end{vmatrix} \quad \text{---Par de variables } Vg - Vc, Fg - Vv$$

4. Hallar el índice de interacción del sistema.

$$I_{ij} = \left| \frac{1 - \mu_{ij}}{\mu_{ij}} \right|$$

$$I_{11} = \left| \frac{1-1}{1} \right| = 0 \quad I_{12} = \left| \frac{1-0}{0} \right| = \infty$$

$$I_{21} = \left| \frac{1-0}{0} \right| = \infty \quad I_{22} = \left| \frac{1-1}{1} \right| = 0$$

5. Diseñe el desacoplador estático para el sistema

$$\begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Gp_{11} & Gp_{12} \\ Gp_{21} & Gp_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & D_{12} \\ D_{21} & 1 \end{bmatrix}$$

$$[B] = [Gp]^{-1} \quad B_{jj} = \frac{1}{k'_{jj}}$$

$$B_{ji} = \begin{bmatrix} 0.212 & -0.058 \\ 0 & 0.171 \end{bmatrix}$$

$$D_{ij} = \frac{B_{ij}}{B_{jj}} \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.276 & 1 \end{bmatrix}$$

6. Con la matriz de desacoplador obtenida complete el sistema en lazo abierto, como se muestra en la figura 5.2.3.3 y observe el comportamiento del sistema con desacopladores.

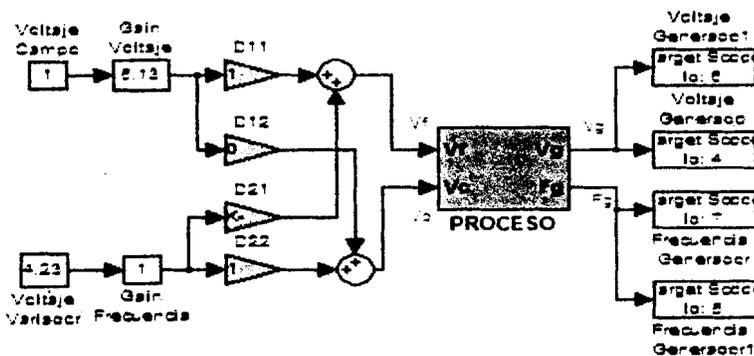


FIGURA 5.2.3.3 LAZO ABIERTO CON DESACOPLADOR

5.2.4 Conclusiones y Recomendaciones

- Para un sistema MIMO se puede desacoplar el sistema por medio de desacopladores que ayudan a que los sistemas trabajen separados.
- Al realizar el cálculo de selección por pares de variables se desea que cada variable controlada se controle por la variable manipulada con mayor influencia sobre aquella.
- Se recomienda que el estudiante al tomar mediciones sean las más precisas posibles para que al realizar los cálculos obtenga la matriz de desacoplador del sistema.

5.3 Práctica 3: Obtención del Controlador para un sistema multivariable

5.3.1 Objetivo

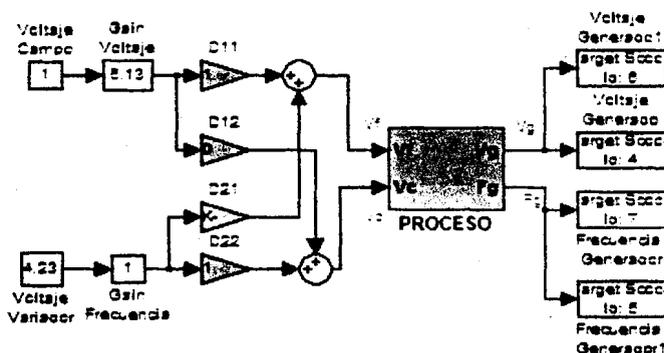
- Aprender dos formas (empírico y analítico) para la obtención de los controladores del sistema.

- Conocer las ventajas y diferencias los controladores obtenidos de forma analítica y empírica.
- Aprender a utilizar la herramienta SISO para el análisis del sistema y obtener el controlador con parámetros de sobrenivel porcentual y tiempo de estabilización requeridos.

5.3.2 Práctica

5.3.2.1 Cálculo del controlador de forma empírica

- 1 Con el sistema en lazo abierto en el cual se incluye la matriz de desacopladores, figura 5.3.2.1.1. Mantenga constante el valor del voltaje de campo a cualquier valor y varíe la variable voltaje del variador (Vv) de 0 a 5.



**FIGURA 5.3.2.1.1 SISTEMA LAZO ABIERTO CON
DESACOPLADOR**

Con la herramienta xpcrctool, en el menú de herramienta, seleccione Target PC Screeb Shot, el cual permite que capture la imagen que muestra la pantalla del PC remoto. Para este caso se captura la imagen de la curva de frecuencia del generador. Figura 5.3.2.1.2.

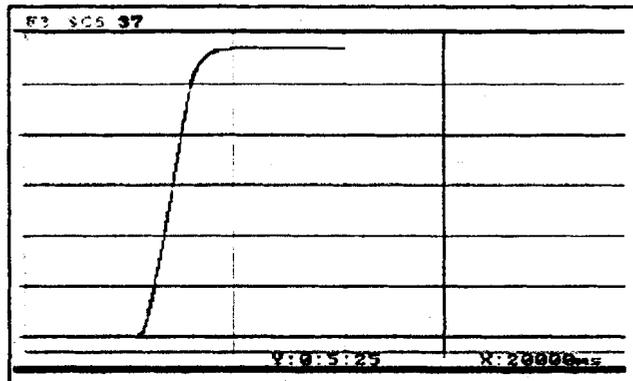


FIGURA 5.3.2.1.2 CURVA DE FRECUENCIA DEL
GENERADOR

2. Con la curva de frecuencia, calcule k_p y T_i .

Figura 5.3.2.1.3

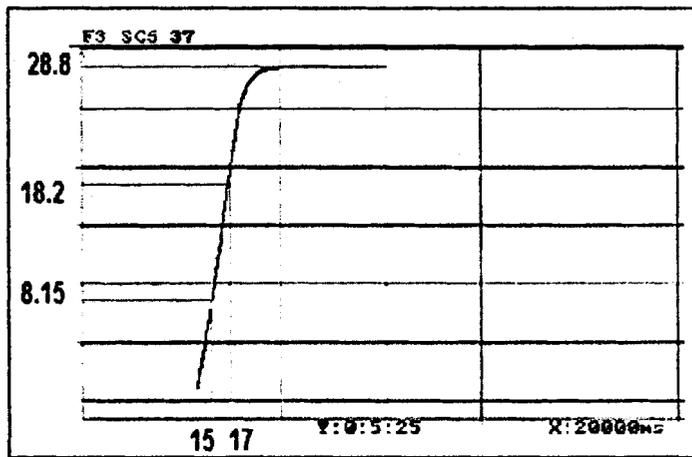


FIGURA 5.3.2.1.3 CURVA DE FRECUENCIA DEL
GENERADOR CON t_1 Y t_2

t_1 a 0.283 de 28.8 es igual a 8.15 = 15 seg

t_2 a 0.632 de 28.8 es igual a $18.2 = 17$ seg

$$T_{ao} = 3/2 (t_2 - t_1) = 3/2 (2) = 3$$

$$K = AC / A_m = 30 / 28.8 = 1.04$$

Tenemos que el controlador es el siguiente:

$$PI \Rightarrow \frac{1.04}{3s+1}$$

3. Obtenga la curva del voltaje generado variando el voltaje de campo de 0 a 3 y manteniendo el voltaje de variador constante a un valor de 4. En la figura 5.3.2.1.4 se muestra la gráfica que se obtuvo como resultado.

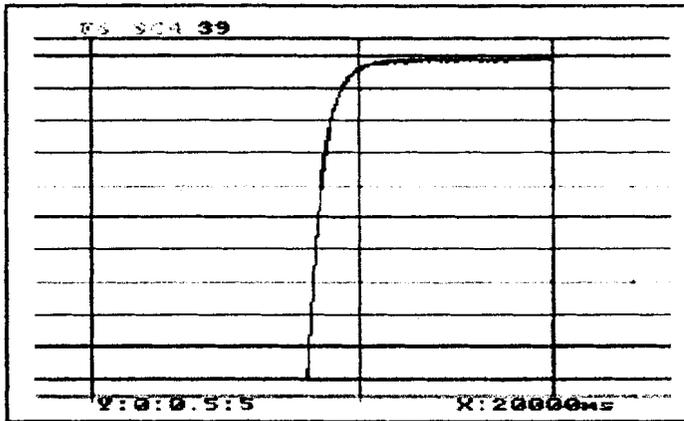


FIGURA 5.3.2.1.4: CURVA DEL VOLTAJE
GENERADO

4. Con la curva de voltaje generado, calcule los valores respectivos de k y T_i para el controlador como se muestra en la figura 5.3.2.1.5.

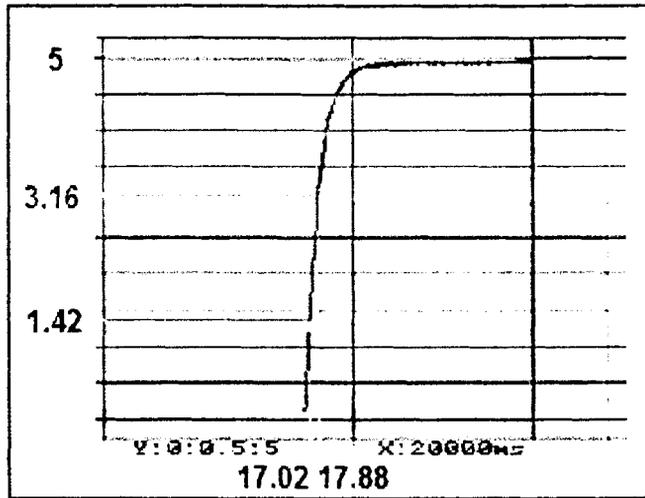


FIGURA 5.3.2.1.5 CURVA DE VOLTAJE
GENERADO CON t_1 Y t_2

t_1 a 0.283 de 5 es igual a 1.42 = 17.02 s

t_2 a 0.632 de 5 es igual a 3.16 = 17.88 s

$$Tao = 3/2 (t_2 - t_1) = 3/2 (0.86) = 1.3$$

$$K = AC / Am = 6 / 5.28 = 1.136$$

Tenemos que el controlador es el siguiente:

$$PI \Rightarrow \frac{1.136}{1.3s + 1}$$

5. Con los controladores obtenidos se completa el sistema a lazo cerrado como se muestra en la figura 5.3.2.1.6

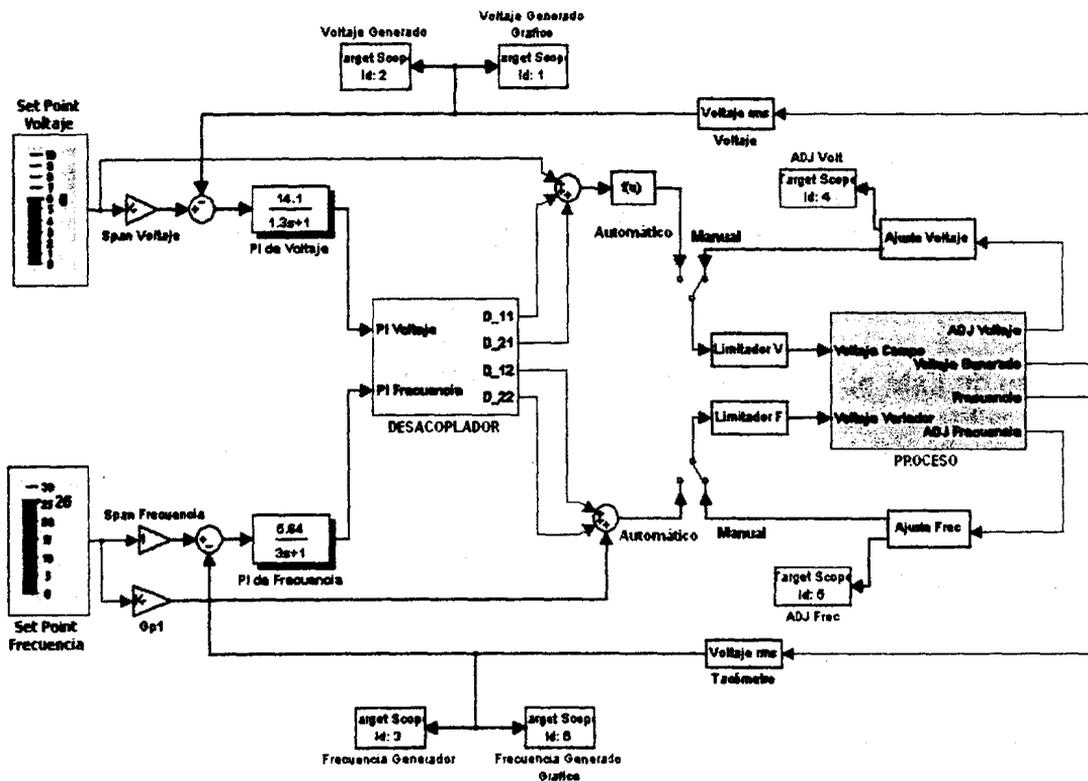


FIGURA 5.3.2.1.6: SISTEMA A LAZO CERRADO CON CONTROLADORES CALCULADOS DE FORMA EMPIRICA

5.3.2.2 Cálculo del controlador con la herramienta SISO

Para determinar los controladores, primero se va a calcular el controlador para el sistema Fg/Vc para luego calcular el controlador del sistema Vg/Vc.

• Controlador PI del sistema Fg/Vc

1 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>> load motor
```

En este paso se carga en el workspace los datos de las variables fg (frecuencia generada) y vc (voltaje de control) para determinar la función de transferencia por medio de System Identification.

2 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>> ident
```

Se abre la venta de System, de la lista desplegable *Data*, seleccione Import. En Input escriba *vc* que es la variable manipulada y en Output escriba *fg* es es la variable controlada, en Samp. Inter. escriba 0.1 que es el intervalo de muestreo. Presione Import. Figura 5.3.2.2.1

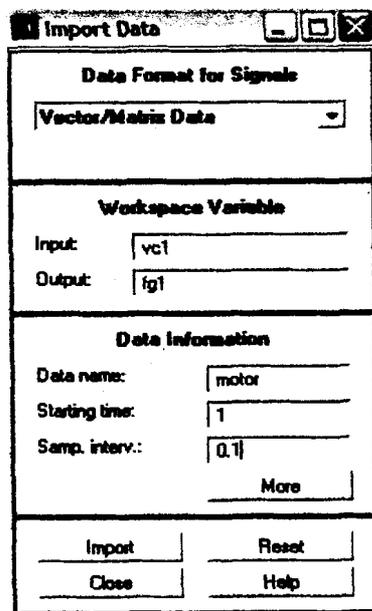
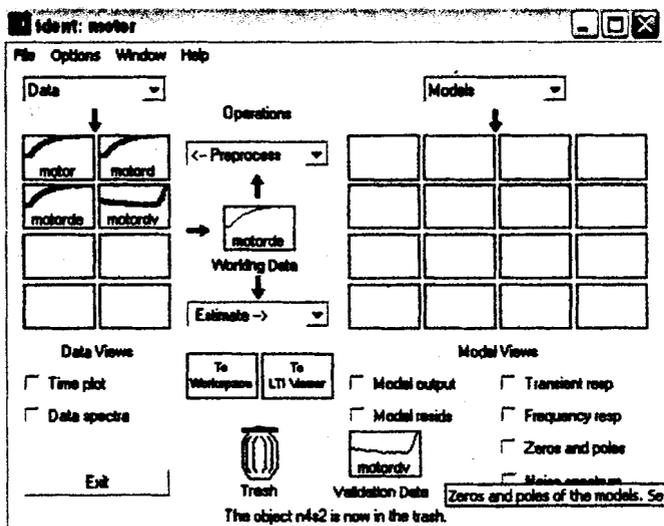


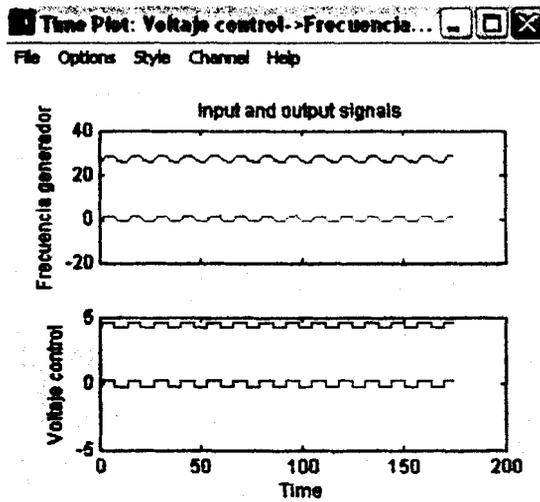
FIGURA 5.3.2.2.1 IMPORT DATA

3 En la lista *Preprocess* seleccione la opción ***Quick Start***, el cual en la tabla de datos se cargan los datos: *motord*, que son los datos sin

constante de nivel; *motorde* que es una porción de los datos los cuales System los va a utilizar para la estimación del modelo; *motordev* el cual es la siguiente porción de los datos con los cuales se va a realizar la validación del modelo que genera System. La figura 5.3.2.2.2 muestra el resultado.



(A)

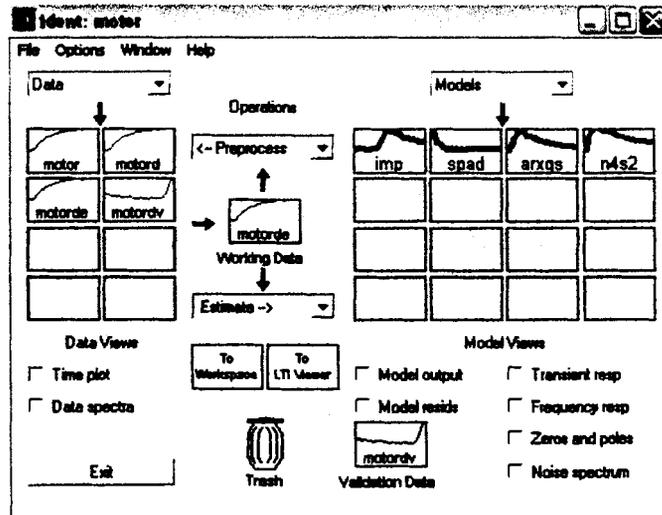


(B)

FIGURA 5.3.2.2 (A) DATOS PROCESADOS; (B) VOLTAJE CONTROL, SEÑAL DE ENTRADA Y FRECUENCIA GENERADOR, SEÑAL DE SALIDA

- 4 De la lista *Estimate* seleccione la opción *Quick Start*, esta opción realiza la estimación del modelo matemático del sistema, en la tabla de los modelos se cargan la respuesta al impulso (imp), la respuesta de frecuencia del sistema (spad) y los

modelos para un sistema discreto (arxqs) y para un sistema continuo (n4s2). Figura 5.3.2.3.



(A)

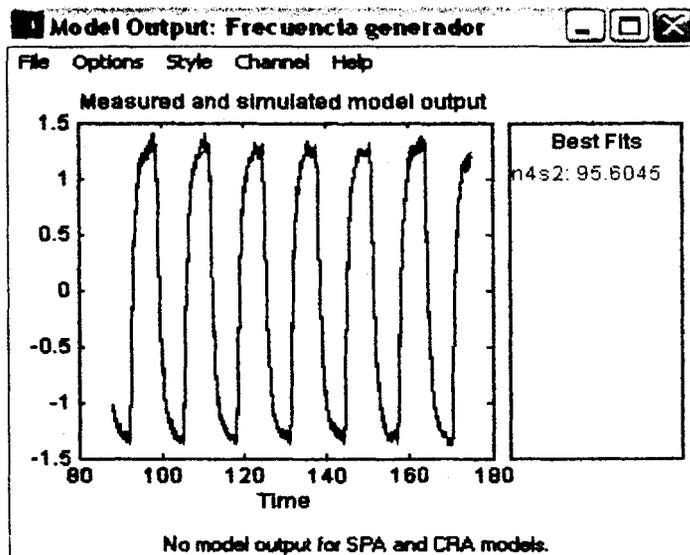


FIGURA 5.3.2.3 A) MODELOS ESTIMADOS B)
MODELOS DE LA SEÑAL DE SALIDA

5 Para llevar el modelo n4s2 al workspace se debe arrastrar al ícono **To Workspace**, el cual carga el modelo en el workspace de MatLab.

6 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>>[num,den]=tfdata(n4s2,'v')
```

```
num =
```

```
0 -0.1445 0.4306
```

```
den =
```

```
1.0000 -1.4432 0.4875
```

Este comando guarda en las variables num y den el numerador y denominador respectivamente de la función de transferencia del modelo estimado por System Identification.

7 La función de transferencia del modelo estimado está dada en función de la Transformada Z, para

guardar en una variable la función de transferencia

se escribe lo siguiente:

```
>>zmotor=tf(num,den,0.1)
```

$$\frac{-0.1445z + 0.4306}{z^2 - 1.443z + 0.4875}$$

8 Para pasar de Transformada Z a Transformada de Laplace utilice el siguiente comando:

```
>>smotor=d2c(zmotor)
```

$$\frac{-4.315s + 40.32}{s^2 + 7.185s + 6.238}$$

Donde **smotor** es la función de transferencia del modelo fg/vc cuando vf permanece constante.

9 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>>sisotool(smotor)
```

Se muestra la siguiente pantalla (figura 5.3.2.2.4)

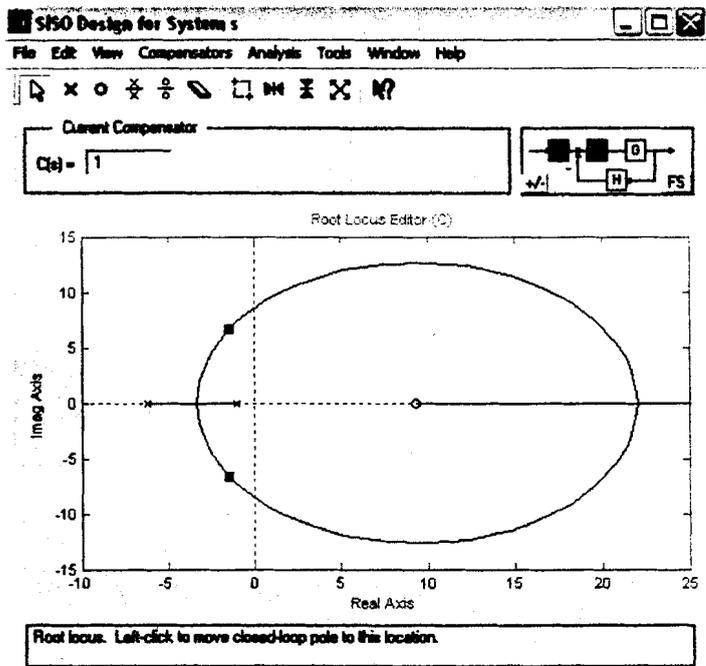


FIGURA 5.3.2.2.4 TRAYECTORIA DE LAS RAÍCES DEL SISTEMA FG/VC

En la figura 5.3.2.2.5 se muestra la respuesta al comando Escalón, para mejorar el error de estado estacionario y el tiempo de estabilización del sistema, se lo realiza por medio de un controlador proporcional integral (controlador PI).

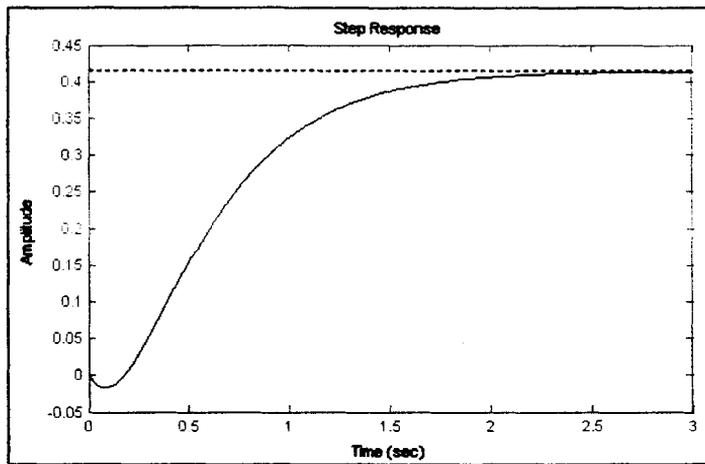


FIGURA 5.3.2.2.5 RESPUESTA AL ESCALÓN DEL SISTEMA FG/VC

- 10 Determine el controlador con un sobre nivel porcentual $< 5\%$ y un tiempo de estabilización < 8.5 s, figura 5.3.2.2.6

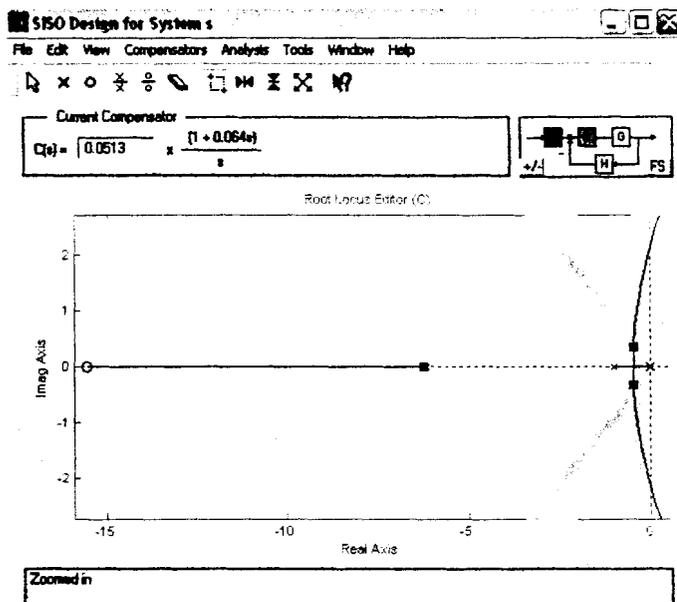


FIGURA 5.3.2.2.6 TRAYECTORIA DE LAS RAICES DEL SISTEMA F_g/V_c CON CONTROLADOR PI

El polo del controlador está ubicado en el origen y el cero real ubicado en -15.6. El controlador queda de la siguiente forma:

$$PI \Rightarrow 0.0513 \frac{(1 + 0.064s)}{s}$$

En la figura 5.3.2.2.7 se muestra la respuesta al Escalón del sistema.

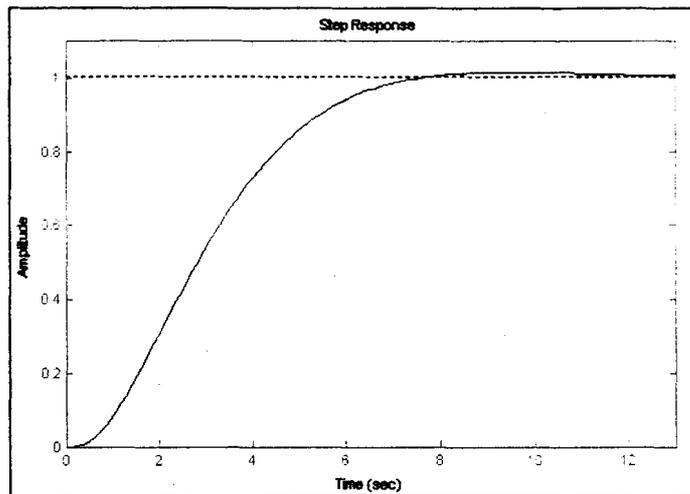


FIGURA 5.3.2.2.7 RESPUESTA AL ESCALON DEL SISTEMA CON EL CONTROLADOR PI

- **Controlador PI del sistema V_g/V_f**

1 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>> load generador
```

En este paso se carga en el workspace los datos de las variables v_g (voltaje generado) y v_f (voltaje de campo) para determinar la función de transferencia.

- 2 Siga los pasos 2 hasta el 5 mostrados para el sistema F_g/V_c colocando en *Input* la variable v_f y en *Output* la variable v_g .

El modelo a obtener se muestra en la figura 5.3.2.2.8.

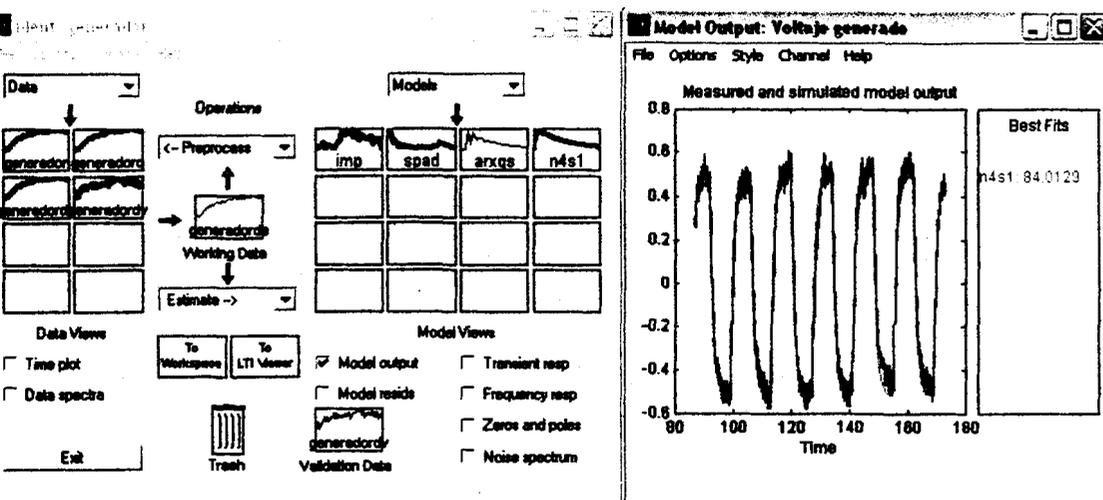


FIGURA 5.3.2.2.8 A) MODELOS ESTIMADOS DEL SISTEMA, B) MODELO N4S1

- 3 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>>[num,den]=tfdata(n4s1,'v')
```

```
num =
```

0 0.2191

den =

1.0000 -0.9134

- 4 Guarde la función de transferencia en la variable `zgenerator`:

```
>>zgenerator=tf(num,den,0.1)
```

$$\frac{0.2191}{z + 0.9134}$$

- 5 Pase la función de Transformada Z a Transformada de Laplace:

```
>>sgenerator=d2c(zgenerator)
```

$$\frac{2.292}{s + 0.9054}$$

Donde `sgenerator` es la función de transferencia del modelo v_g/v_f cuando v_c permanece constante.

- 6 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>>sisotool(sgenerator)
```

Se muestra la siguiente pantalla (figura 5.3.2.2.9)

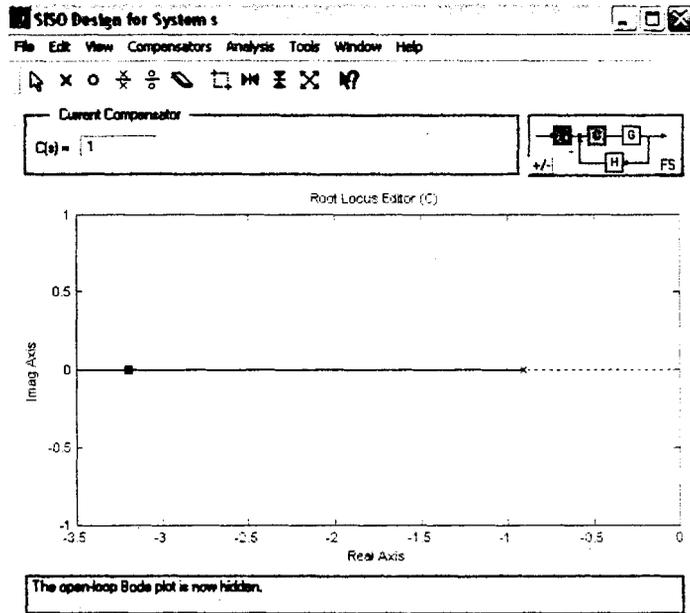
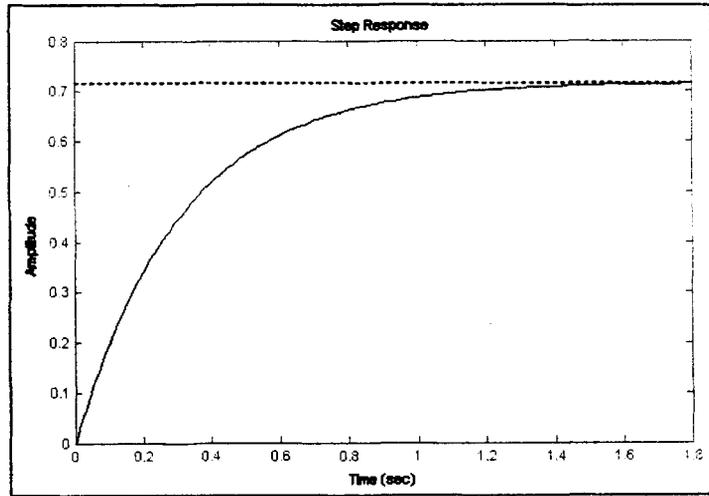


FIGURA 5.3.2.2.9 TRAYECTORIA DE LAS RAICES DEL SISTEMA VG/VF

En la figura 5.3.2.2.10 se muestra la respuesta al comando Escalón, de igual manera para mejorar el error de estado estacionario y el tiempo de estabilización del sistema, se utiliza un controlador proporcional integral (controlador PI).



**FIGURA 5.3.2.2.10 RESPUESTA DEL SISTEMA
AL ESCALÓN**

7 Determine el controlador con un tiempo de estabilización < 2.54 s, figura 5.3.2.2.11

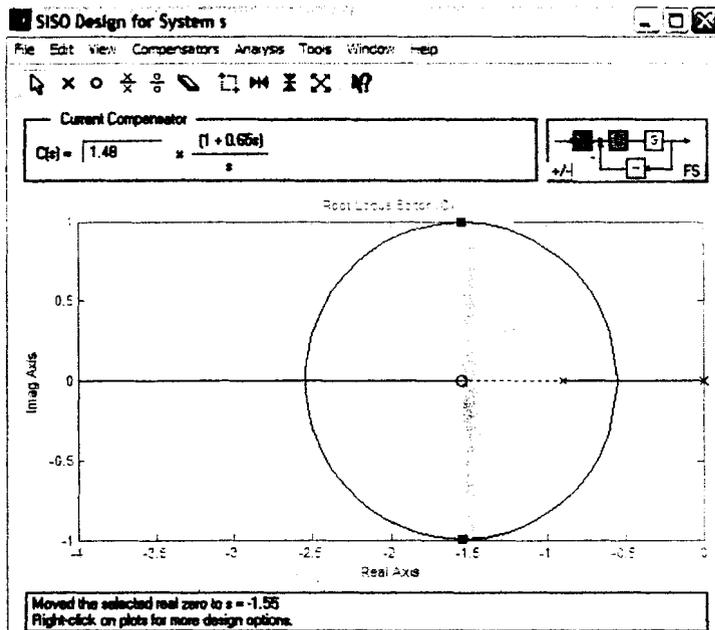


FIGURA 5.3.2.2.11 TRAYECTORIA DE LAS RAICES DEL SISTEMA V_g/V_f CON CONTROLADOR PI

El polo del controlador está ubicado en el origen y el cero real ubicado en -1.55 . El controlador queda de la siguiente forma:

$$PI \Rightarrow 1.48 \frac{(1 + 0.65s)}{s}$$

En la figura 5.3.2.2.12 se muestra la respuesta al Escalón del sistema.

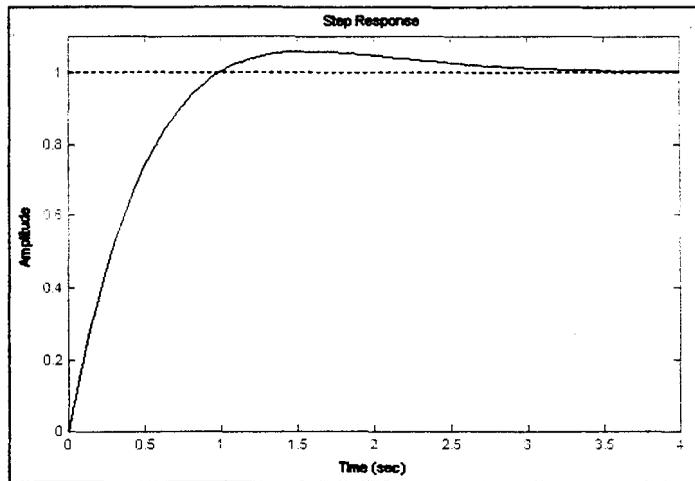


FIGURA 5.3.2.2.12 RESPUESTA AL ESCALON DEL SISTEMA VG/VF CON EL CONTROLADOR PI

En la figura 5.3.2.2.13 se observa el sistema con los controladores de F_g/V_c y V_g/V_f .

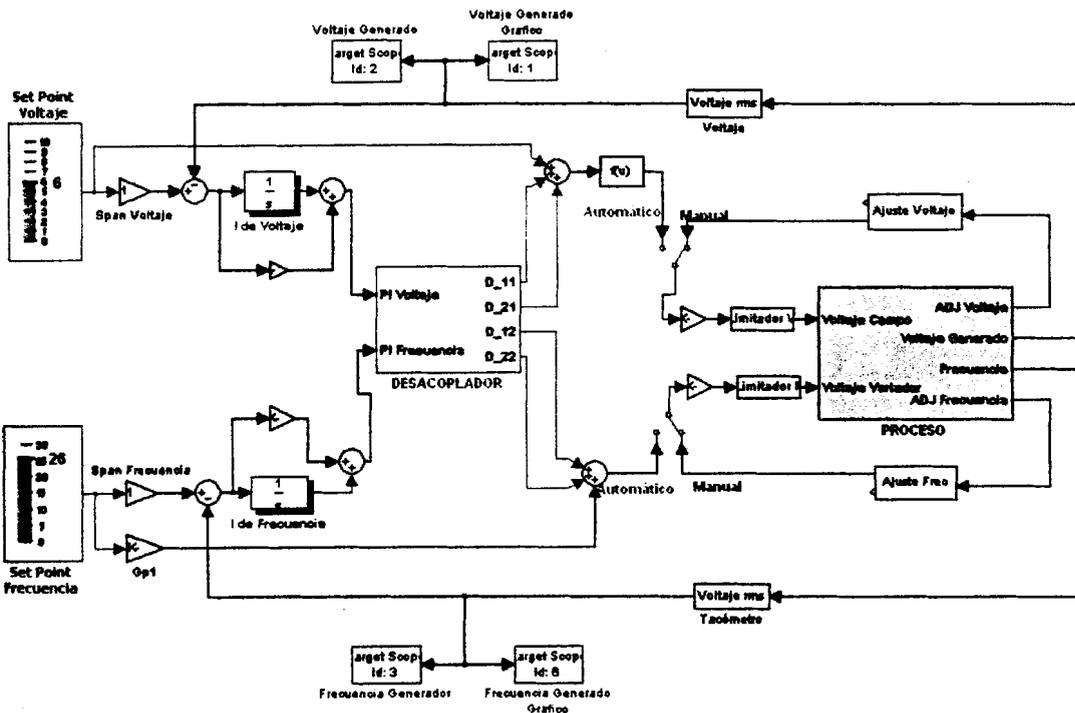


FIGURA 5.3.2.2.13 SISTEMA A LAZO CERRADO CON CONTROLADORES CALCULADOS DE FORMA ANALITICA

5.3.3 Conclusiones y Recomendaciones

- Al calcular los controladores de forma analítica y empírica da al estudiante dos alternativas con las que puede obtener los controladores.
- La ventaja de obtener el controlador de forma empírica es que no se necesita la función de transferencia del sistema

solo la curva de trabajo de la variable del sistema a controlar, esto es útil para sistemas cuyas funciones de transferencias son difíciles de trabajar. Una de las desventajas es que no se obtiene al controlador con especificaciones de sobrenivel ni de tiempo de estabilización, es un método no muy exacto.

- La ventaja de obtener el controlador de forma analítica utilizando la herramienta SISO es que al trabajar con la función de transferencia del sistema a lazo abierto se obtiene un controlador más preciso y se puede determinar al controlador con especificaciones de sobrenivel porcentual y tiempo de estabilización, también se puede observar el comportamiento del sistema con análisis de la respuesta al comando Escalón.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de haber realizado todas las pruebas teóricas y práctica de nuestro sistema de generación de voltaje y frecuencia por medio de MatLab, podemos llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones del sistema estudiado:

- **Conclusiones:**

- En un sistema multivariables lo primero que debemos conocer antes de ejecutar un control es el nivel de acoplamiento entre las variables del sistema.
- El estudio de desacoplamiento nos indica que por medio de ganancias obtenidas de una matriz, podemos desacoplar las señales.
- En caso de variables con un índice alto de acoplamiento no es posible su control sin antes desacoplarlos.

- En nuestro sistema los valores máximos de trabajo son limitados por los valores máximos permitidos por la tarjeta electrónica Pc-6024-E. Estos valores máximos del sistema son: 9 VDC de seteo de voltaje y 28 HZ de seteo de frecuencia.
- En caso que se desee aumentar el seteo se debe modificar en los circuitos electrónicos de adecuación de señales las relaciones entre valor obtenido del sistema físico y valor que ingresa al computador, permitiendo un mayor rango de variación de trabajo.
- El tiempo de subida de nuestro sistema es muy corto, lo cuál le impide estabilizarse frente a grandes perturbaciones.
- Por medio de MatLAB y Simulink podemos simular cualquier sistema real y más aún controlarlo, las variantes serán siempre los sensores de señales de campo.
- El sistema puede realizar control de valor de seteo (servo control), con el sistema off-line y también puede realizar control frente a variación de carga (control regulador) en el sistema on-line.

- La diferencia entre el sistema realizado sin desacoplamiento y el sistema con desacoplamiento es que la variación de una variable no afecta a la otra, siendo este el objetivo número uno del sistema.

- Existen dos métodos para obtener el controlador, el método empírico es muy utilizado para sistemas en los cuales es muy complejo obtener el modelo del sistema, facilitando los cálculos pero tiene las limitaciones:
 - o No puede realizar pruebas con varios tipos de señales.
 - o Es menos exacto.
 - o Se basa en el método de prueba y error.
 - o Depende mucho del criterio de la persona.
 - o Depende las pruebas de las facilidades de los equipos.

- El segundo método es el analítico, el cual es utilizado una vez obtenido el modelo del sistema, por nuestro caso utilizamos la herramienta SYSTEM APPLICATION para obtener el modelo obteniendo las siguientes ventajas frente al empírico:
 - o Puedes hacer prueba con diferentes señales.
 - o Las pruebas no dependen de las facilidades de los equipos.

- El controlador se basa a condiciones definidas (sobre nivel porcentual, tiempo de estabilización, etc.)
 - Es más exacto
 - Permite ver el comportamiento del sistema frente a modificaciones del controlador de forma inmediata.
- Para evitar sobre niveles porcentuales elevados el error entre la señal medida y la señal seteada debe ser lo menor posible, esto incluye al momento de realizar el cambio de manual a automático.

- **Recomendaciones:**

- Antes de colocar el sistema en automático se debe llegar al valor del seteo con el sistema manual.
- Al desear realizar cambios en el seteo, se debe primero colocar al sistema en modo manual estabilizando el sistema por medio de los potenciómetros externos hasta llegar al valor deseado.
- Si desea observar un mayor valor de perturbación se recomienda realizar el cambio de la carga por una de mayor potencia de consumo.

- En sistema de multivariables es aconsejable primero analizar los índices de interacción de variables antes de realizar un lazo cerrado.
- Para poder controlar sistemas de multivariables primero se deben desacoplar y luego obtener el controlador.
- Para sistemas donde puedan obtener el modelo se recomienda obtener el controlador de forma analítica.
- Los valores de tiempo estabilización y sobre nivel porcentual, deben ser colocados tomando en cuenta las limitaciones físicas que puede tener el sistema.
- El primer paso para controlar es medir, por lo cuál se recomienda seleccionar bien los sensores del sistema, tomando en cuenta niveles de señales, ruido y forma de transmitir.
- Proteger siempre la tarjeta de entrada de señal al computador por medio de circuitos electrónicos de adecuación y limitación de señales, evitando

que por una mala maniobra ingrese una señal no deseada que afecta la tarjeta.

- Utilizar sistema de potencia externos, para aumentar la potencia de las señales que envía el computador al sistema físico.
- Verificar siempre que las señales que está viendo el computador sea igual a las señales físicas, es decir, calibrar bien los sensores de campo ya que por medio de ellos se logra el control.
- Crear un programa ejecutable con lo cuál se elimina la utilización de un computador, disminuyendo el costo de implementación de este sistema.

ANEXOS

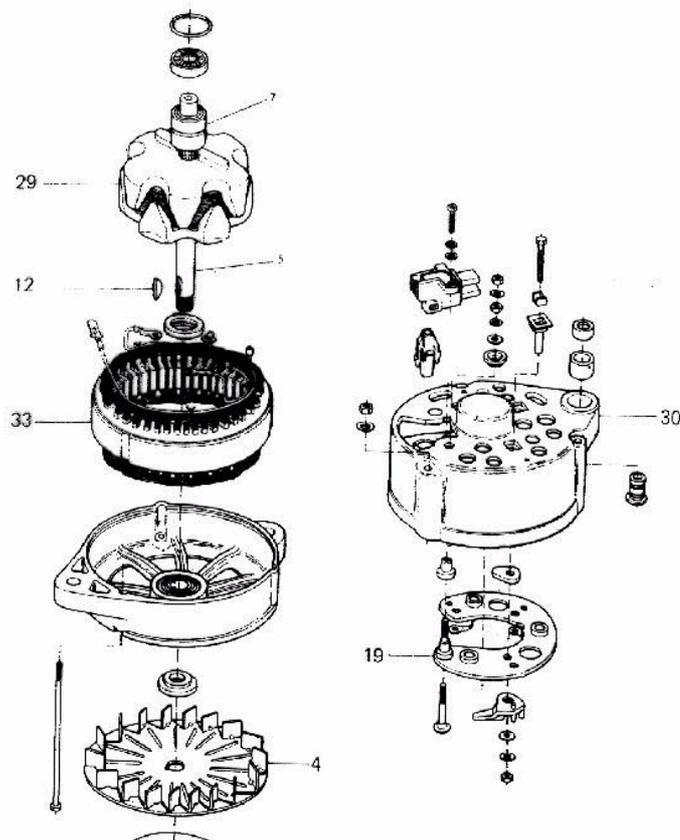
Anexo A

Teoría de Equipos

ALTERNADOR

Es el elemento encargado de generar la corriente eléctrica. Recibe este nombre por que genera corriente de tipo alterna. Los actuales alternadores son trifásicos, de ahí su alto rendimiento a bajas revoluciones.

Despiece de alternador



ELEMENTOS DEL ALTERNADOR

Se compone de los siguientes elementos:

- un rotor o inductor.
- un estator o inducido.
- un puente rectificador de la corriente.

El rotor está compuesto por dos masas polares, con una serie de garras, entrelazadas entre sí y un bobinado enrollado en el interior de las masas polares alimentado en sus extremos a través de dos anillos rozantes, sobre los que asientan dos escobillas.

El estator está compuesto por tres bobinados formando una conexión trifásica en estrella o en triángulo.

El puente rectificador está compuesto esto por seis diodos, dos por cada una de las tres fases del bobinado trifásico. En los alternadores que son autoexcitados los puentes de rectificación son nanodiodos, seis de potencia y tres de excitación.

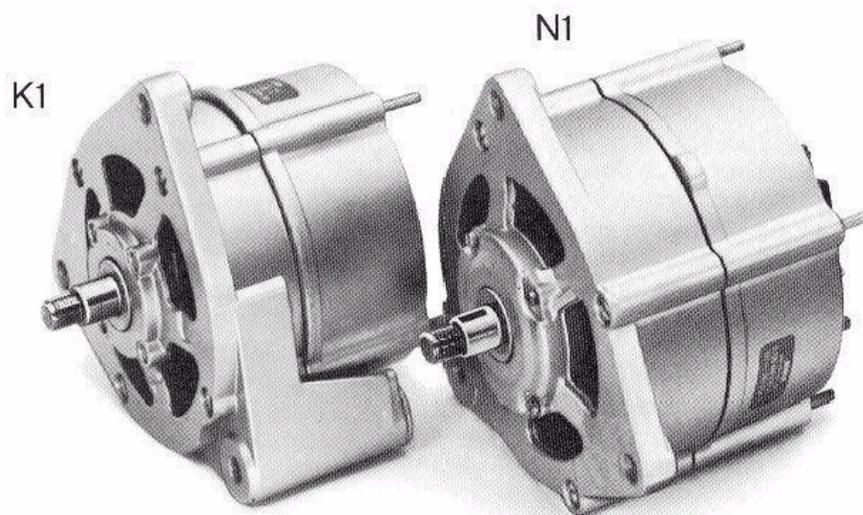
FUNCIONAMIENTO INTERNO

El funcionamiento interno del alternador está basado en el fenómeno de inducción electromagnética.

El rotor es arrastrado por el motor del vehículo y alimentado con corriente a través de las escobillas. Este genera un campo magnético inductor que al girar hace que los bobinados del estator corten las líneas del campo produciéndose una inducción electromagnética que hace que aparezca una tensión en el estator. La corriente eléctrica generada es de tipo alterna pero al pasar por el puente de diodos esta es rectificada y transformada en corriente continua.

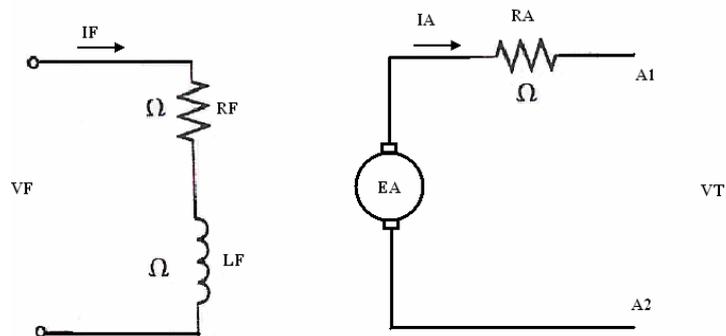
En las siguientes fotos veremos algunos de los tipos de alternadores que hay.

Alternadores de polos intercalados
(G1, N1)
con anillos rozantes
Estructura monobloque con fijación
por brazo giratorio. Rectificador
incorporado. Regulador adosado.



El alternador genera corriente, pero si tomamos en cuenta, que las revoluciones del motor suben y bajan, de acuerdo a la aceleración que tenga, estaremos de acuerdo de que a mas revoluciones de motor, mas corriente genera, por esta razón no se puede concebir un alternador sin un sistema que lo estabilice, a esto se le llama regulador de voltaje; y de acuerdo con el fabricante de los alternadores, unos lo construyen con el regulador incorporado, y otros con el regulador aparte, pero la función sigue siendo la misma, estabilizar la corriente. Nuestro alternador es con regulador externo, quién regulará la corriente será nuestro sistema de control.

A continuación se muestra el circuito equivalente de un alternador con devanado de excitación separada.



Como se muestra en el circuito, la excitación del alternador es separada del devanado inducido, esto es cuestión básica para nuestra tesis ya que al ser separada podemos controlar el flujo magnético independiente de las variables del devanado inducido.

MOTOR

En todo motor eléctrico podemos distinguir dos partes: rotor y estator. El rotor está fijado a un eje (Ver figura 1.1), e introducido dentro del estator mediante rodamientos, de forma que puede girar libremente.

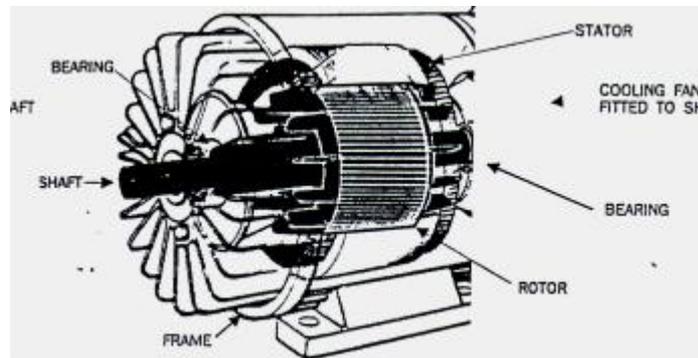


Figura 1.1: Constitución del motor de jaula de ardilla

El rotor se construye con barras cortocircuitadas eléctricamente por medio de anillos en los extremos formando la denominada jaula de ardilla (Ver figura 1.2). Cuando el motor se conecta a una fuente de suministro trifásica, el estator induce unas corrientes en las barras del rotor. La interacción del campo magnético generado entre el rotor y el estator origina el par y por tanto la rotación del rotor.

Al final del eje del rotor se fija un ventilador, encargado de refrigerar el interior del motor cuando este está girando.

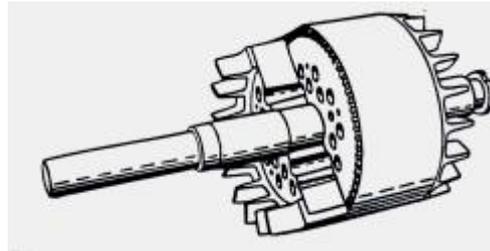


Fig 1.2: Constitución del rotor

El estator se construye con acero perforado y montado como un cilindro hueco, la parte interior es un armazón de hierro fundido o aluminio (ver figura 1.3). Unas bobinas distribuidas en tres fases se distribuyen en las ranuras del interior de la circunferencia. Cada una de las tres bobinas del estator tienen dos mitades, colocadas en posiciones diagonalmente opuestas respecto al estator. Las bobinas estén desfasadas 120° entre sí, (estas bobinas están representadas en la figura 1.4). El sentido de arrollamiento de las bobinas es tal que, cuando la corriente pasa a través de ellas, se induce un campo magnético a través del rotor. En este caso, cada bobina tiene dos polos, con lo que el motor será **bipolar**.

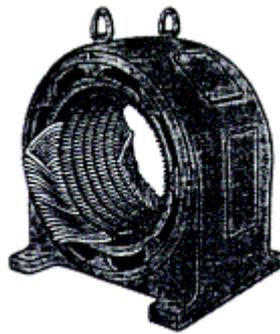


Figura 1.3: Estator de dos polos

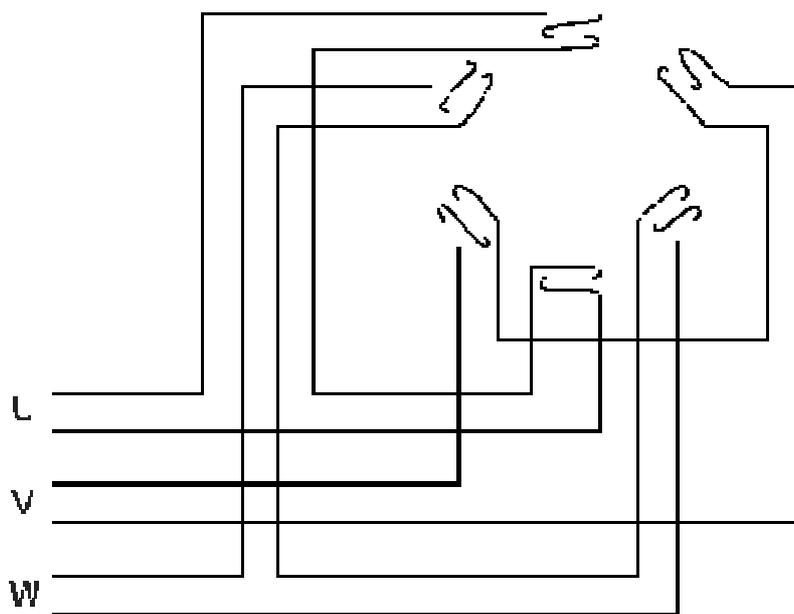


Figura 1.4: Cableado de un estator de dos polos

Las bobinas en un estator de dos polos se muestran en la figura 1.4. Cuando tres bobinas se conectan a una alimentación trifásica ya sea en configuración estrella o triángulo, crean un campo magnético que produce la rotación. La velocidad de rotación del campo está directamente relacionada con la frecuencia de la alimentación. Así, una alimentación de 50Hz crea un campo de rotación de 50 rev./segundo, es decir, 3000 r.p.m (figura 1.5.)

En el estator dibujado en la figura 1.6, cada bobina tiene cuatro secciones, desfasadas 90° entre sí. Cuando la corriente pasa por cada una de las bobinas, en el estator se crean dos campos magnéticos, con lo que cada bobina tiene cuatro polos y el motor se denomina **tetrapolar**. Si observamos la figura 1.6, cuando las bobinas se conectan a una fuente de alimentación trifásica, el campo magnético gira a la mitad de la frecuencia de suministro. Por lo tanto para un suministro de 50Hz la velocidad de rotación del campo será de 25 rev./segundo o lo que es lo mismo 1500 r.p.m.

De la misma forma, el campo en un estator de 6 polos gira a un tercio de la frecuencia de alimentación, (1000 r.p.m. a 60Hz) y para un estator de 8 polos el campo gira a un cuarto de la frecuencia de alimentación (750 r.p.m. a 60Hz).

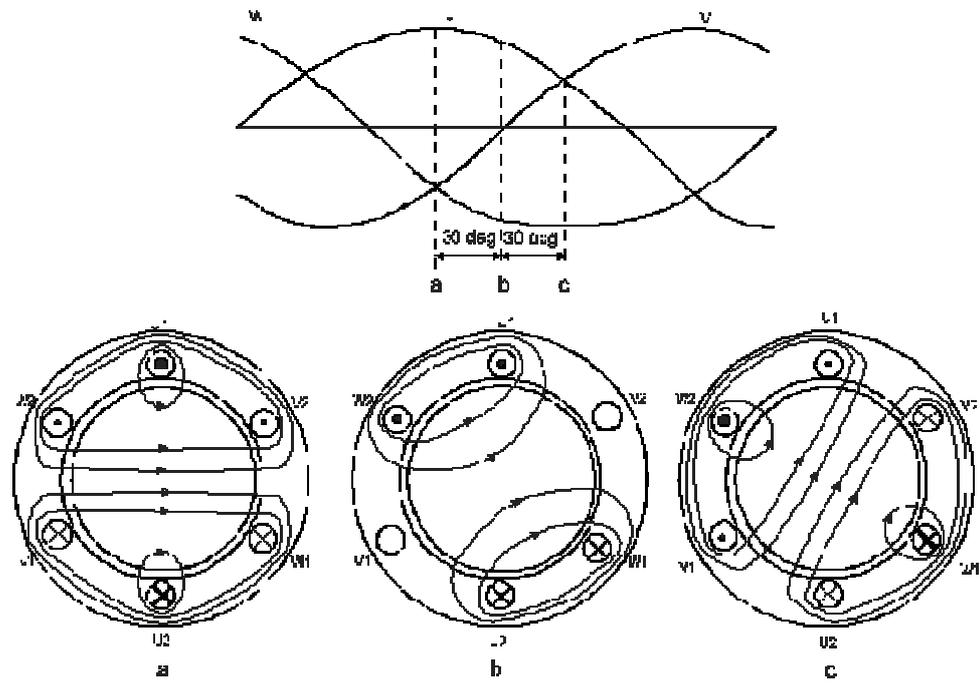


Figura 1.5: Generación del campo magnético rotatorio en un motor de dos polos

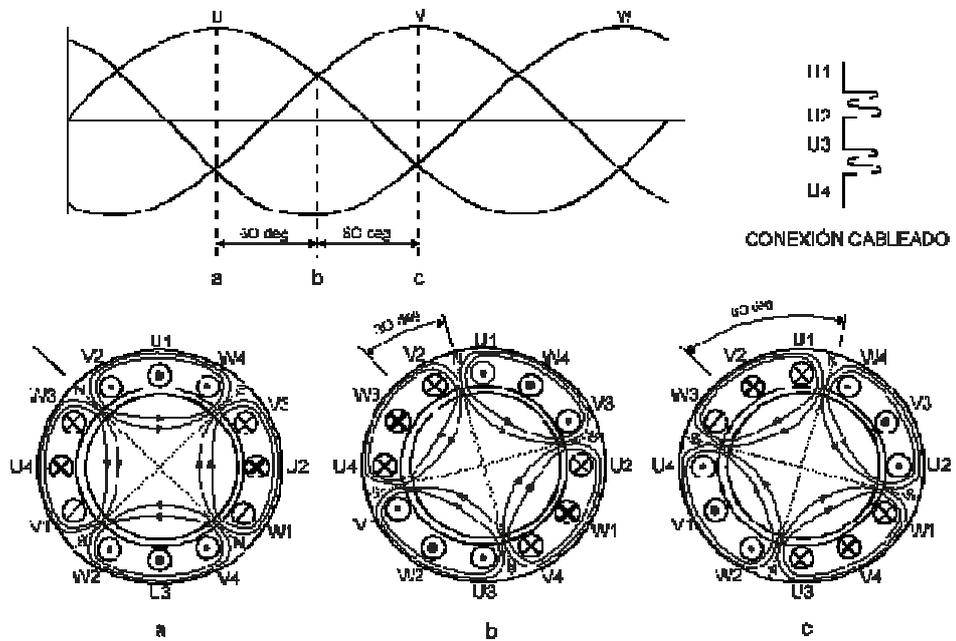
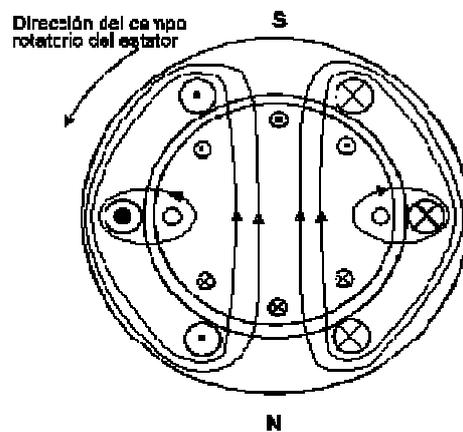


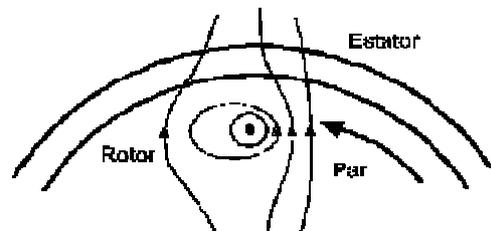
Fig 1.6: Generación del campo magnético en un estátor tetrapolar

Cuando aplicamos tensión en bornes del motor, el campo magnético rotativo generado por las bobinas del estator corta el rotor, generando corrientes inducidas en sus barras (figura 1.7a).

La frecuencia de la corriente del rotor es proporcional a la diferencia entre la velocidad del rotor y el campo magnético generado por el estator, y se denomina **frecuencia de deslizamiento**. La corriente del rotor induce un campo magnético en el rotor que gira a la misma velocidad que el campo del estator, siendo la interacción entre ambos campos la que produce un par de giro en el rotor (figura 1.7b)



a: Corrientes inducidas en el rotor



b: Interacción entre los campos para producir par

Figura 1.7: Corrientes inducidas en el rotor

CONTROL DE VELOCIDAD EN MOTORES DE INDUCCIÓN

En principio un motor de jaula de ardilla es un motor de velocidad fija, pero que puede ser controlada actuando sobre el número de polos, y la frecuencia de suministro a la que está conectado.

La ecuación de la velocidad de un motor es:

$$N = \frac{f \cdot 120}{p} - s$$

donde:

N = Velocidad del motor en revoluciones por minuto

f = Frecuencia de suministro al motor en Hz

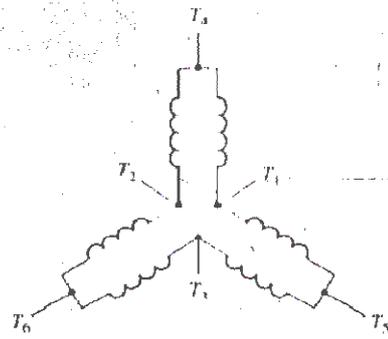
p = Número de polos en el estator

s = Deslizamiento del motor en revoluciones por minuto

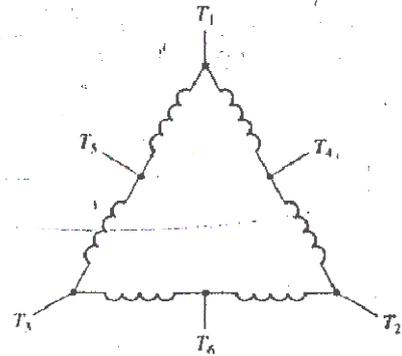
De esta ecuación, puede verse que la velocidad puede ser variada de tres formas diferentes:

a) Cambiando el número de polos.

Esto requiere un motor con doble bobinado, y además la velocidad no varía de forma continua sino que se produce un salto de una velocidad a otra. Por ejemplo, un motor de 2/8 polos conectado a 50Hz tiene dos velocidades de sincronismo: 3000 y 750 r.m.p.



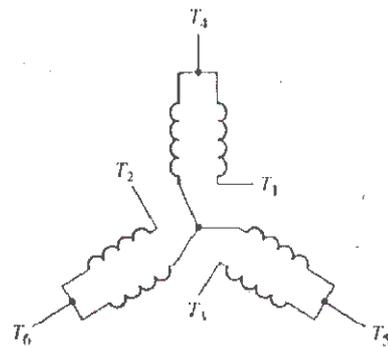
Velocidad	Lineas			
	L_1	L_2	L_3	
Baja	T_4	T_2	T_3	T_4, T_5, T_6 abiertas
Alta	T_4	T_5	T_6	T_1, T_2, T_3 conjuntas



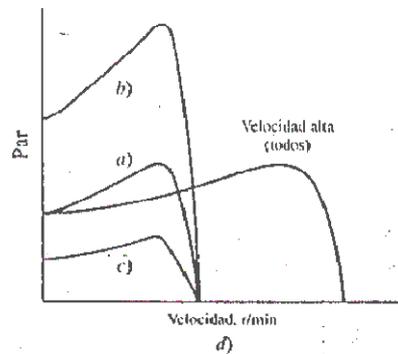
Velocidad	L_1	L_2	L_3	
	Baja	T_4	T_5	
Alta	T_1	T_2	T_3	T_4, T_5, T_6 abiertas

a)

b)



Velocidad	Lineas			
	L_1	L_2	L_3	
Baja	T_1	T_2	T_3	T_4, T_5, T_6 abiertas
Alta	T_4	T_5	T_6	T_1, T_2, T_3 conjuntas



d)

b) Cambiando el deslizamiento.

Esto puede hacerse variando la tensión suministrada al motor, lo que provoca que la curva de par velocidad disminuya causando un mayor deslizamiento conforme aumenta la carga en el motor. En general, la

reducción de par es proporcional al cuadrado de la reducción de voltaje. Ver figura 1.13.

Para trabajar correctamente, este método requiere una carga con una característica creciente de par y velocidad. Cualquier variación en la carga causara una variación en la velocidad del motor.

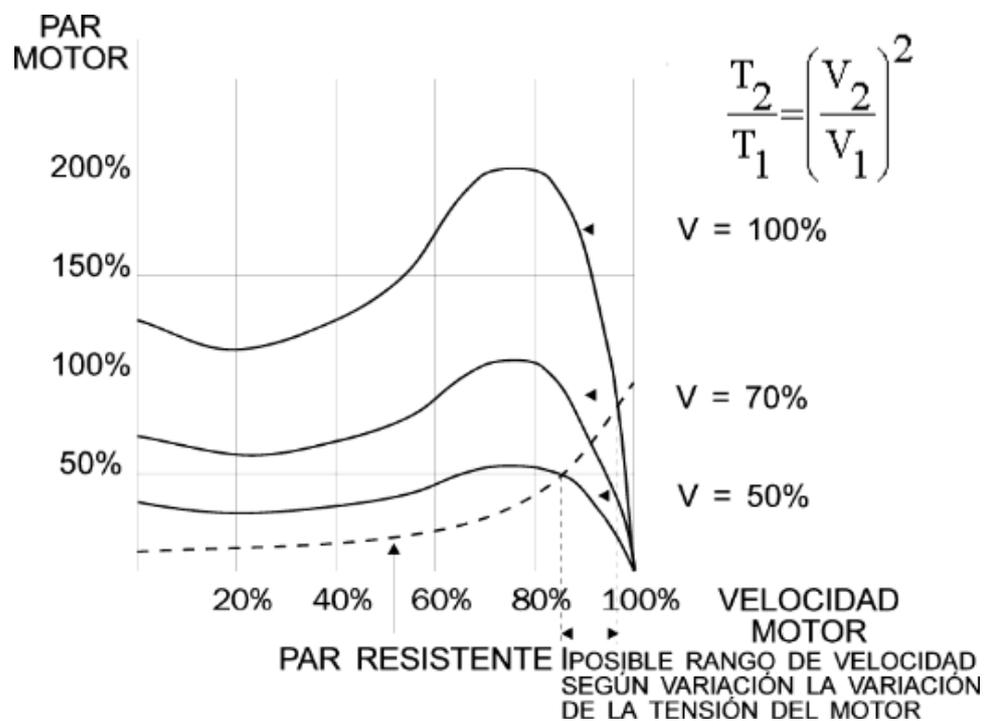
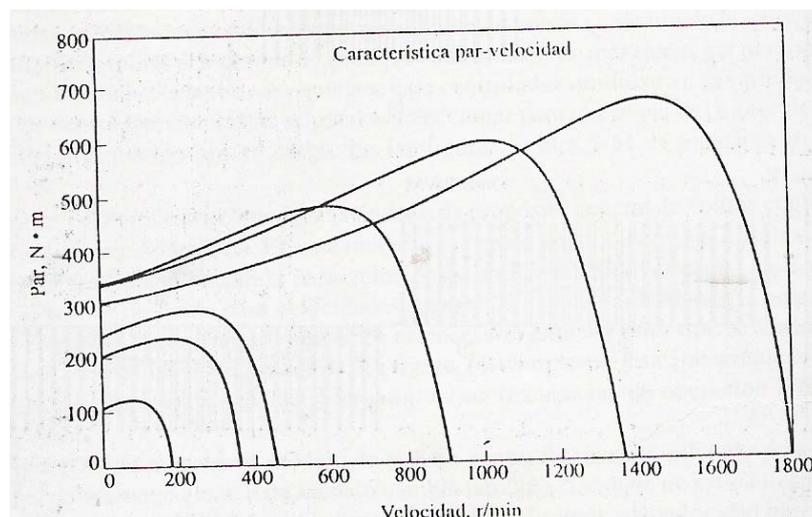


Figura 1.13: Variación de velocidad actuando sobre el deslizamiento

c) Variando la frecuencia de suministro del motor.

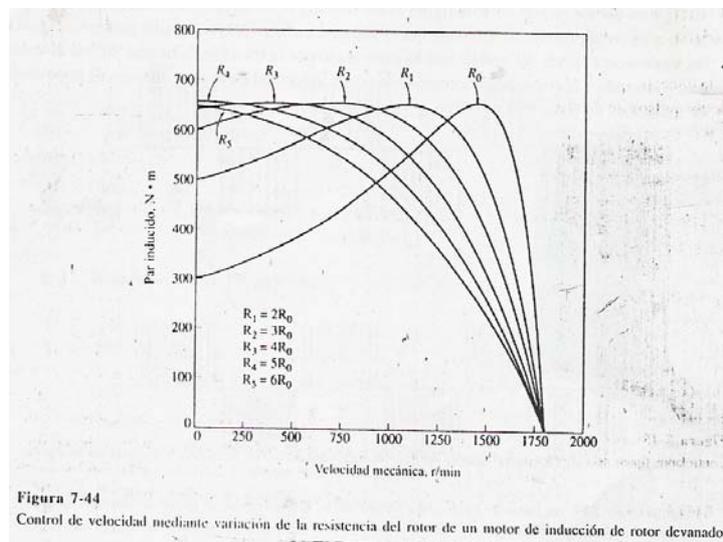
Este método es el utilizado por los controladores de velocidad electrónicos. La figura 2.1 muestra la familia de curvas par-velocidad cuando se modifica la frecuencia de alimentación. Este es el mejor método para el control de la velocidad, por las siguientes razones:

- Se obtiene un rendimiento elevado en todo el rango de velocidades.
- Se dispone de una variación continua (sin saltos) de la velocidad, que puede ser controlada eléctricamente vía señales de control tales como 0-10Vdc o 4-20mA. Esto hace que los variadores de velocidad para motores de CA sean ideales para los procesos de automatización



d) Mediante cambio de la resistencia del rotor.

Este método es el utilizado en los motores de inducción de rotor devanado es posible cambiar la forma de la curva par – velocidad insertando resistencia extras en el circuito del rotor de la máquina. En la figura se muestra las curvas características par – velocidad resultante. Si la curva par – velocidad de la carga es como la que se muestra en la figura, al cambiar la resistencia del rotor variará la velocidad de operación del motor. Sin embargo, la inserción de la resistencias extras en el circuito del rotor de un motor de inducción reduce bastante la eficiencia de la máquina. Tal método de control de la velocidad se utiliza sólo durante periodos cortos debido a los problemas de eficiencia que conlleva.



Variador de Frecuencia

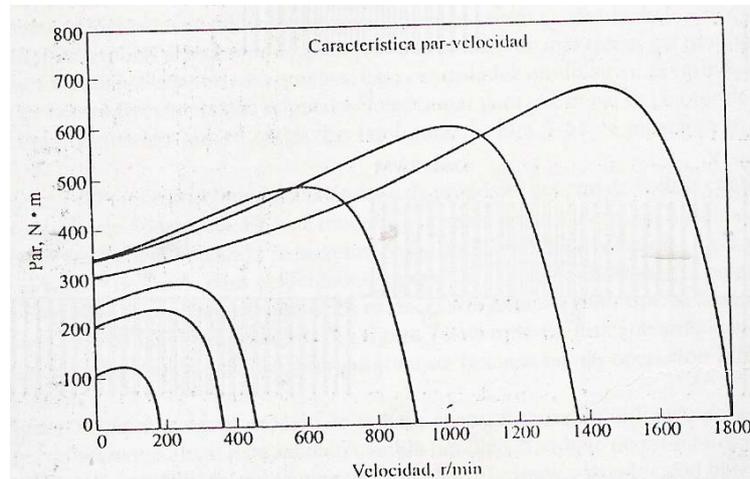
El motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad. La velocidad del motor asincrónico depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación.

Como la frecuencia de alimentación que entregan las Compañías de electricidad es constante, la velocidad de los motores asincrónicos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el resbalamiento o la frecuencia.

El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia. No se requieren motores especiales, son mucho más eficientes y tienen precios cada vez más competitivos.

El variador de frecuencia regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar

la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor.



Los variadores de frecuencia están compuestos por :

Etapa Rectificadora. Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.

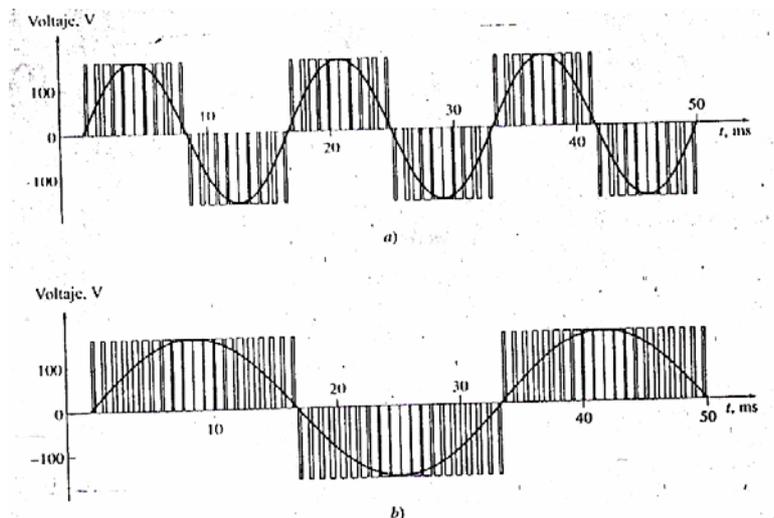
Etapa intermedia. Filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos.

Inversor o "Inverter". Convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBT's (Isolated Gate Bipolar Transistors) para generar los pulsos controlados de tensión. Los equipos más modernos utilizan IGBT's inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones

por sobrecorriente, sobretensión, baja tensión, cortocircuitos, puesta a masa del motor, sobretemperaturas, etc.

Etapas de control. Esta etapa controla los IGBT para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia. Y además controla los parámetros externos en general, etc.

Los variadores más utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia. Los fabricantes que utilizan bobinas en la línea en lugar del circuito intermedio, pero tienen la desventaja de ocupar más espacio y disminuir la eficiencia del variador.



El Inversor o Inverter convierte la tensión continua de la etapa intermedia en una tensión de frecuencia y tensión variables. Los IGBT envían pulsos de duración variable y se obtiene una corriente casi senoidal en el motor.

La frecuencia portadora de los IGBT se encuentra entre 2 a 16kHz. Una portadora con alta frecuencia reduce el ruido acústico del motor pero disminuye el rendimiento del motor y la longitud permisible del cable hacia el motor. Por otra parte, los IGBT's generan mayor calor.

Las señales de control para arranque, parada y variación de velocidad (potenciómetro o señales externas de referencia) están aisladas galvánicamente para evitar daños en sensores o controles y evitar ruidos en la etapa de control.

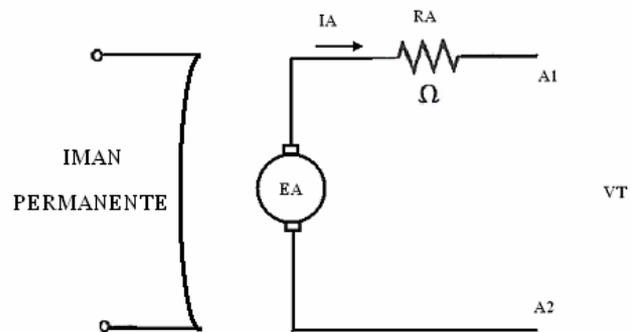
TACÓMETRO

El tacómetro es un medidor de revoluciones que se emplea para indicar la velocidad de avance instantánea. Esta ha sido la medida que más a interesado al automovilista, puesto que se tomaba como el índice más importantes de las prestaciones de un vehículo; por esta razón, el tacómetro (velocímetro) ha sido uno de los primeros instrumentos utilizados en un vehículo y la base de la toma de datos de campo de nuestra tesis.

La medida, desde los primeros tacómetros, se efectuaba tomando el movimiento de un órgano que giraba a una velocidad angular proporcional a la velocidad de avance; por tanto; midiendo dicha velocidad podría obtenerse una lectura transformada directamente en velocidad de avance. La evolución técnica de los tacómetros se refiere al método de medida de velocidad angular; los primeros tacómetros efectuaban la medida de la velocidad angular derivándola de la fuerza centrífuga (mecanismo de Watt); en los casos de mayor prestigio se empleaban complicados instrumentos de relojería. En la siguiente fase de la evolución (tacómetro magnético), la medida de la velocidad se efectúa poniendo en rotación un imán permanente que, al girar, arrastra un disco, retenido por un muelle, unido a una aguja indicadora del instrumento. Otros tacómetros efectúan la medida convirtiendo la velocidad de rotación en magnitud eléctrica; también estos instrumentos están dotados de imanes permanentes que al inducir en bobinas fijas una tensión proporcional a la velocidad de rotación, permiten la medida de ésta última mediante una lectura eléctrica. En otros casos, existe una transmisión flexible del movimiento, denominada "látigo" desde la toma de movimiento hasta el instrumento; la existencia de esta transmisión plantea problemas de instalación y de ruido, de manera que es preferible emplear un tacómetro electrónico, que representa la fase más avanzada en la evolución técnica. No debe olvidarse que el tacómetro toma de

movimientos y se derivaran dos medidas: velocidad angular y número total de revoluciones realizado.

El modelo de tacómetro utilizado es de imán permanente con un rotor devanado con el cuál se obtenido 40 mV por vuelta; esta señal que envía el tacómetro será ingresada al computador para realizar el control adecuado.



DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DEL CIRCUITO

EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

El circuito equivalente de un motor de inducción es una herramienta muy útil para determinar la respuesta del motor a los cambios de carga, cuyo criterio lo podemos transferir a los demás equipos rotativos de la tesis.

Las pruebas que se van a realizar para poder determinar los parámetros del modelo del motor real deberán llevarse en condiciones perfectamente controladas puesto que las resistencias varían con la temperatura y la resistencia del rotor varía también con la frecuencia. Los detalles precisos de cómo llevar las pruebas están descritos en la norma 112 de la IEEE.

Las pruebas de equipos es el método por el cual podemos conocer:

- 1.- Parámetros de operación de los equipos
- 2.- Niveles de voltaje y corriente del equipo
- 3.- Curvas característica de trabajo del equipo
- 4.- Parámetros interno del equipo que nos permite simularlo matemáticamente y conocer su comportamiento frente una carga.
- 5.- Pérdidas del equipo

Todos estos datos antes mencionados nos ayudarán para utilizar el programa systems identification y obtener la función de transferencia real de todo el sistema.

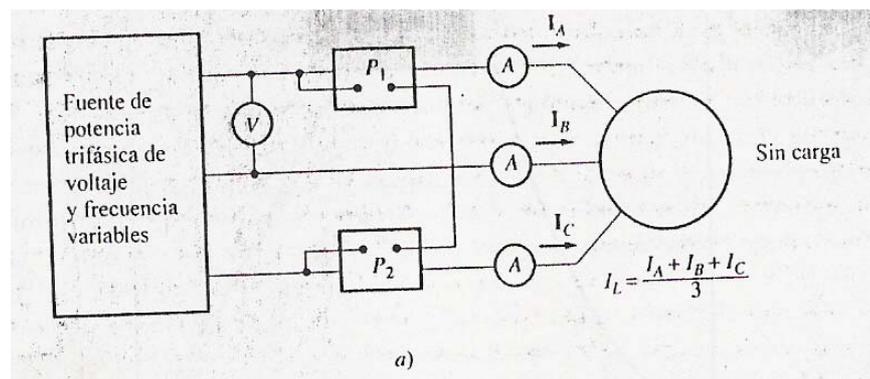
Las pruebas que realizaremos son:

1. Prueba de vacío
2. Prueba de rotor bloqueado
3. Prueba de corriente continua

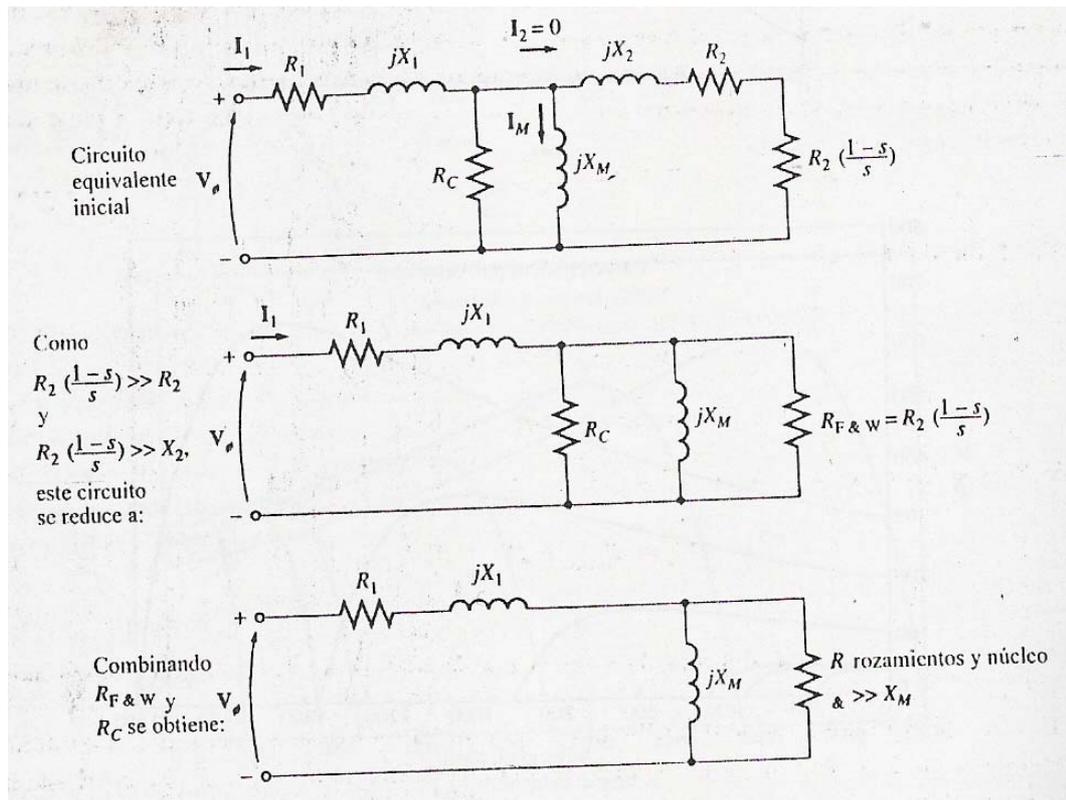
A continuación procederemos a explicar teóricamente cada una de las pruebas que vamos a realizar.

Prueba de vacío

En un motor de inducción, la prueba de vacío mide las pérdidas rotacionales del motor y suministra información sobre su corriente de magnetización. El circuito de esta prueba se muestra a continuación:



En la figura superior se encuentra el circuito necesario para la prueba en la figura inferior se encuentra el circuito resultante, del motor. Nótese que en vacío, la impedancia del motor es en esencia la combinación de R_1 , jX_1 , y jX_m



Los vatímetros, un voltímetro y tres amperímetros se conectan al motor de inducción al cual se le permite girar libremente. La única carga puesta sobre el motor es su rozamiento propio y el rozamiento con el aire, de modo que la P_{conv} . Es consumida en el motor por las pérdidas mecánica y el deslizamiento del motor es muy pequeño (posiblemente cerca de 0.001 o menos). En la figura se encuentra el circuito equivalente de este motor. Con

este pequeños deslizamiento, la resistencia correspondiente a su potencia convertida, $R_2 \cdot (1 - s) / s$, es mucho mayor que la resistencia correspondiente a la pérdida del cobre del rotor R_2 y mucho mayor que la reactancia del motor X_2 . En este caso, el circuito equivalente se reduce aproximadamente al último circuito . Allí la resistencia de salida está en paralelo con la reactancia de magnetización X_m y la resistencia de pérdidas en el núcleo R_c .

En este motor en condiciones de vacío, la potencia de entrada medida por los vatímetros debe ser igual a la pérdidas en el motor. Las pérdidas en el cobre del rotor son despreciables debido a que la corriente I_2 es extremadamente pequeña (debido a la gran resistencia de la carga $R_2 \cdot (1 - s) / s$, y por lo tanto puede ser despreciada. Las pérdidas en el cobre está dada por:

$$P_{scl} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1$$

Por consiguiente la potencia de entrada debe ser igual a:

$$P_{in} = P_{scl} + P_{núcleo} + P_{f\&w} + P_{misc}$$

$$P_{in} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 + P_{rot}$$

Donde P_{rot} son las pérdidas rotacionales del motor:

$$P_{rot} = P_{núcleo} + P_{f\&w} + P_{misc}$$

Entonces, dada que la potencia de entrada al motor, se puede determinar las pérdidas rotacionales de la máquina.

El circuito equivalente que describe la operación del motor en esta condición contiene las resistencias R_c y $R_2 \cdot (1-s) / s$ en paralelo a la reactancia de magnetización X_m . La corriente necesaria para establecer el campo magnético es muy grande en un motor de inducción debido a la alta reluctancia de su entrehierro, de modo que la reactancia X_m será mucho menor que las resistencias en paralelo con ella y el factor de potencia total de entrada será muy pequeño. Con esa gran corriente en atraso, la mayoría de la caída de voltaje se producirá a través de los componentes inductivos del circuito. La impedancia de entrada del equipo es entonces aproximadamente.

$$Z_{eq} = V_{\Phi} / I_{1, nl} \approx X_1 + X_m$$

Y si X_1 se puede encontrar de alguna forma, la impedancia de magnetización X_m será conocida por el motor.

Prueba de corriente continua

La resistencia del rotor R_2 juega un papel crítico en la operación de un motor de inducción. Entre otras cosas R_2 determina la forma de la curva par – velocidad al establecer la velocidad a la cual ocurre el par máximo. Para

determinar la resistencia total del circuito del motor, se puede aplicar al motor una prueba estándar, llamada *prueba de rotor bloqueado* que se explica más adelante, sin embargo esta prueba sólo determina la resistencia total. Para encontrar la resistencia aproximada del rotor R2 es necesario conocer R1 de modo que ésta se puede restar de la total.

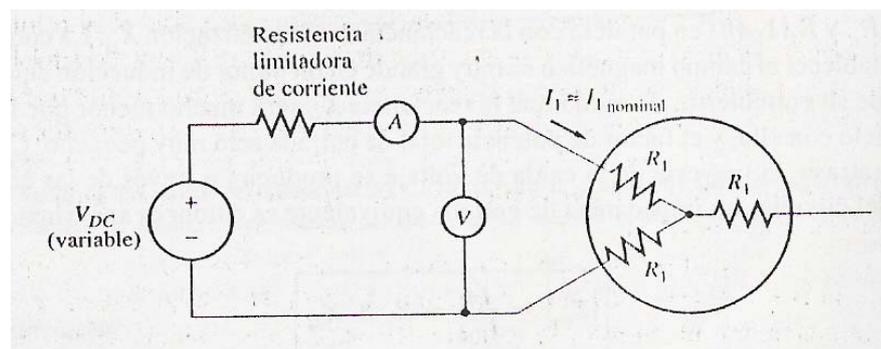
Con la prueba de voltaje DC podemos determinar R1 independiente a los demás parámetros del motor. Se aplica un voltaje DC a los devanados del estator del motor de inducción; puesto que la corriente es DC, no hay voltaje de inducido en el circuito del rotor y en éste no fluye corriente resultante. Así mismo, la reactancia a corriente directa del motor es cero. Entonces, la única cantidad que limita el flujo de corriente en el motor es la resistencia del estator, y por lo tanto, ésta puede ser determinada.

El circuito básico para la prueba DC se muestra en figura, donde se encuentra una fuente DC conectada a dos de los tres terminales del motor de inducción conecta en Y. En la prueba se comienza modificando el voltaje DC de entrada hasta que obtengamos el valor de corriente nominal del estator. La corriente en los devanados del estator se ajusta al valor nominal para que los devanados se caliente a las misma temperatura que tendrían durante la operación normal (recuérdese que la resistencia del devanado es en función de la temperatura). La corriente fluye a través de los dos

devanados, de modo que la resistencia total en el camino de la corriente es $2R_1$.

$$2R_1 = V_{DC} / I_{DC}$$

$$R_1 = V_{DC} / (2 * I_{DC})$$



Conociendo este valor de R_1 podemos determinar las pérdidas en el cobre del estator en vacío, las pérdidas rotacionales se pueden deducir de la diferencia entre la potencia de entrada en vacío y las pérdidas en el cobre del estator.

Consideraciones que debemos tener en cuenta para ser más exacto en el valor de R_1 , es que se debe realizar una corrección por efecto de la temperatura y el efecto pelicular (norma 112 de IEEE).

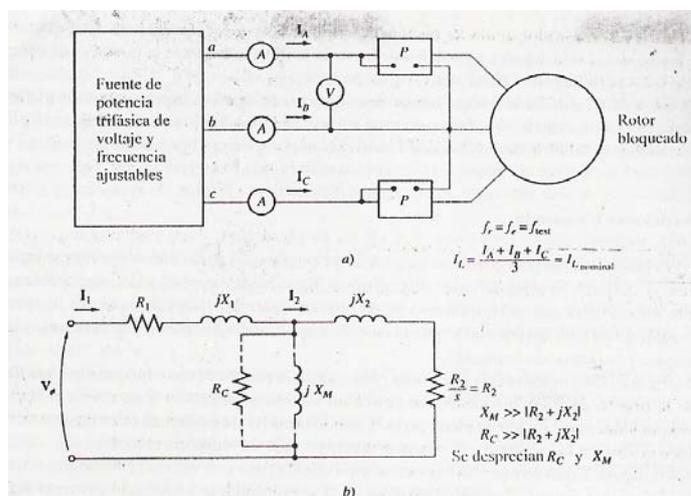
Prueba de rotor bloqueado

Esta prueba de rotor bloqueado también llamada prueba de rotor enclavado, corresponde a la prueba de cortocircuito de los transformadores, en esta

prueba se bloquea o se enclava el rotor de tal forma que no se pueda mover, se aplica voltaje al motor y se mide el voltaje la corriente y la potencia resultante.

La figura muestra las conexiones para realizar la prueba, en la cual se aplica voltaje AC al estator variable hasta llegar al flujo de corriente muy cercano a plena carga. Cuando la corriente se encuentre en el valor de plena carga se registra los valores de voltaje, corriente y potencia que fluye hacia el motor.

En la misma figura se encuentre el circuito equivalente; nótese como el rotor se encuentra quieto, el deslizamiento $s = 1$ y por lo tanto la resistencia R_2 / s es justamente igual a R_2 (un valor muy pequeño). Puesto que R_2 y X_2 son tan pequeños, casi toda la corriente de entrada fluirá a través de ellas en lugar de hacerlo a través de la reactancia de magnetización X_m que es mucho mayor. En estas condiciones, el circuito parece la combinación serie de X_1 , R_1 , X_2 y R_2 .



Después que se han fijado el voltaje y frecuencia de la prueba, el flujo de la corriente se ajusta rápido al valor nominal y se mide la potencia, el voltaje y la corriente de entrada, antes que el rotor se caliente demasiado. La potencia de entrada al motor está dado por:

$$P = \sqrt{3} * V_t * I_L * \cos \theta$$

Por lo tanto el factor de potencia de rotor bloqueado es:

$$FP = \cos \theta = P_{in} / (\sqrt{3} * V_t * I_L)$$

Donde el ángulo de la impedancia θ es igual al coseno inverso del FP

La magnitud de la impedancia total en el circuito del motor es:

$$|Z_{lr}| = V_t / (\sqrt{3} * I_L)$$

Y el ángulo de la impedancia total es θ , por lo tanto:

$$|Z_{lr}| = R_{lr} + jX'_{lr}$$

$$|Z_{lr}| = |Z_{lr}| \cos \theta + j|Z_{lr}| \sin \theta$$

La resistencia de rotor bloqueado R_{lr} es igual a:

$$R_{lr} = R_1 + R_2$$

Mientras que la reactancia de rotor bloqueado X'_{lr} es igual a:

$$X'_{lr} = X'_1 + X'_2$$

Donde X'_1 y X'_2 son las reactancias del estator y del rotor a la frecuencia de prueba, respectivamente.

La resistencia del rotor R2 se puede encontrar a partir de :

$$R2 = R_{lr} - R1$$

Donde R1 es el valor de la resistencia obtenida de la prueba de voltaje DC. Puesto que la reactancia es en función de la frecuencia, la reactancia equivalente total a la frecuencia de operación normal se puede encontrar como:

$$X_{lr} = (f \text{ nominal} / f \text{ test}) * X'_{lr} = X1 + X2$$

La forma de poder independizar las reactancia del rotor y del estator es por medio de la siguiente tabla la cuál fue obtenida de valores experimentales.

	X1 y X2 como funciones de X_{lr}	
Diseño del Rotor	X1	X2
Rotor devanado	0.5 X _{lr}	0.5 X _{lr}
Diseño A	0.5 X _{lr}	0.5 X _{lr}
Diseño B	0.4 X _{lr}	0.6 X _{lr}
Diseño C	0.3 X _{lr}	0.7 X _{lr}
Diseño C	0.5 X _{lr}	0.5 X _{lr}

A continuación mostraremos un ejemplo de cómo obtener el circuito equivalente de un motor de inducción, dichos cálculos fueron realizados bajo EXCEL con lo cuál tenemos la facilidad de obtener el circuito equivalente de cualquier motor solamente ingresando en la hoja del anexo E llamada Parámetros del Motor, los datos de las pruebas de campo del equipo.

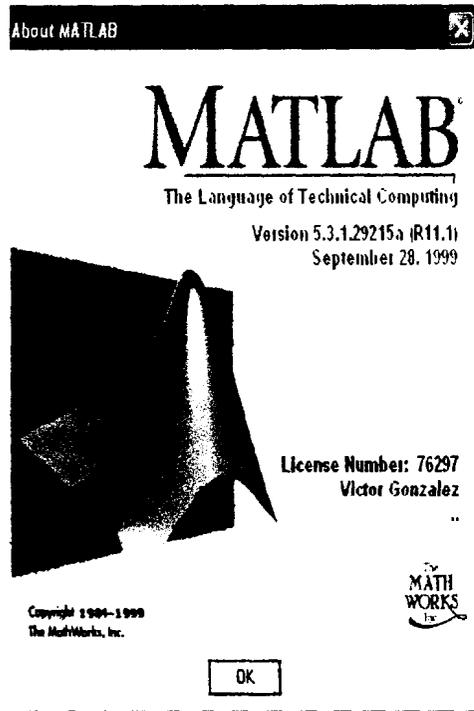
Anexo B

MatLab & Simulink

MatLab significa en inglés Matrix Laboratory fue inicialmente concebido para proporcionar fácil acceso a las librerías LINPACK y EISPACK, las cuales representan hoy en día dos de las librerías más importantes en computación y cálculo matricial. Éste programa fue creado para trabajar principalmente con matrices

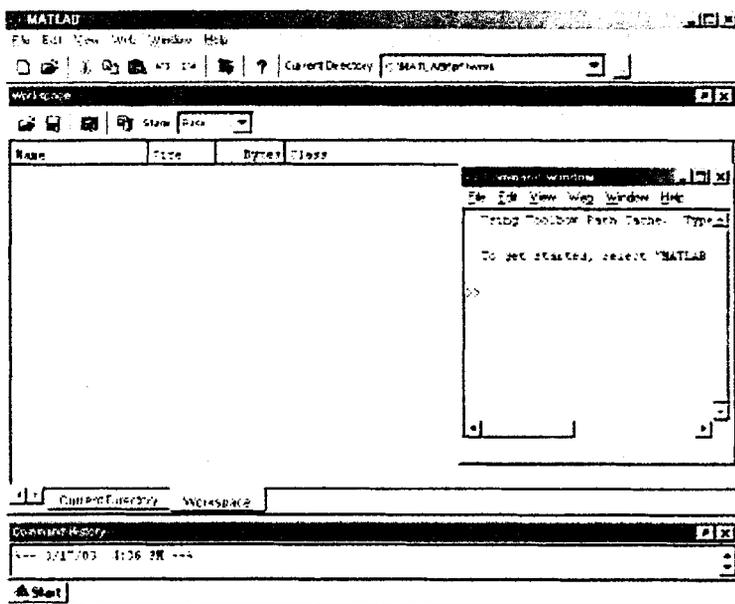
aunque también permite la posibilidad de trabajar con números reales y complejos.

A MatLab se le puede considerar como un lenguaje de programación (como c++ por ejemplo) enfocado hacia el análisis numérico y matemático, y cuenta con características muy especiales como por ejemplo: la continuidad entre valores enteros, reales y complejos. Lo anterior significa que no hay necesidad de declarar las variables antes



de ser utilizadas, ya que todas son tratadas por igual. También la biblioteca de funciones que está incluida con MatLab es mucho más amplia que la de cualquier otro lenguaje de programación; incluye abundantes herramientas gráficas, incluido una GUI y también se puede vincular con otros lenguajes de programación: Todo lo anterior son sólo algunas de las características de MatLab.

Ha llegado la hora de que inicies MatLab en tu ordenador. Verás una pantalla similar a la siguiente (esta pantalla puede variar un poco dependiendo de la versión):



En esta ventana se pueden observar los siguientes elementos:

La ventana del área de trabajo (workspace): en ella se muestran las variables con las que estamos trabajando actualmente. Esta ventana tiene en su parte inferior una pestaña llamada directorio actual (Current Directory) que nos mostrará nuestro directorio actual de trabajo y los archivos que contiene.

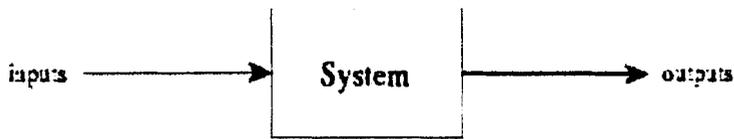
La ventana del historial de comandos (command history): es la ventana en la cual se almacenan los comandos que hemos introducido de manera cronológica.

La ventana de comandos (command window): es por medio de la cual introducimos los datos y observamos los resultados. Cuando se muestra el símbolo " » " en esta ventana, significa que el programa está listo para que empecemos a introducir comandos.

Siendo MatLab la plataforma de trabajo se ha utilizado el **SIMULINK** para poder realizar las simulaciones por medio de diagrama de bloque.

SIMULINK es una extensión de MATLAB que usa una interfaz de manejo de iconos para la construcción de una representación de diagrama de bloque de un proceso. Un diagrama de bloque simplemente es una representación

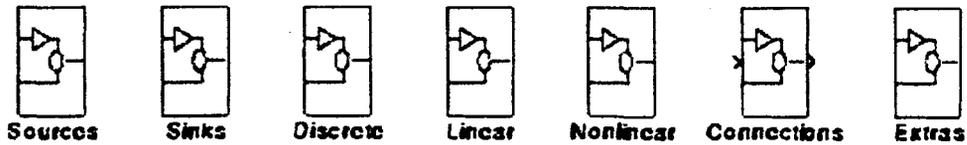
gráfica de un proceso (qué está compuesto de una entrada, el sistema, y un rendimiento).



Típicamente, MATLAB se usa para resolver ecuaciones diferencial ordinarias lineal y nonlinear. Una de las razones por qué MATLAB es relativamente fácil usar es que los "elementos de solución de la ecuación" se proporciona para nosotros, y nosotros accedemos éstos a través de una interfaz de línea de orden (CLI); sin embargo, SIMULINK usa una interfaz del usuario gráfica (GUI) que nos ayuda a resolver las simulaciones de un proceso. En lugar de que se codifique en MATLAB, nosotros conectamos simplemente "los iconos" juntos para construir el diagrama del bloque. El "los iconos" representa las posibles entradas al sistema, las partes de los sistemas, o rendimientos del sistema. SIMULINK le permite al usuario simular los sistemas fácilmente de lineal y nonlinear, las ecuaciones del diferencial ordinarias. La simulación dinámica empaqueta (como MATLAB, SIMULINK, etc.) está usándose cada vez más frecuentemente en las industrias del proceso químicas para la simulación del proceso y plan de sistema de mando.

SIMULINK trabaja bajo programación de iconos (programación orientada a objetos) lo cuál permite una simulación dinámica al usuario, realizando una representación de diagrama de bloque de un proceso. Las secciones del diagrama del bloque son representadas por iconos que están disponible vía las varias "ventanas" que el usuario abre (a través del pulsar el botón doble en el icono). El diagrama del bloque está compuesto de iconos que representan secciones diferentes del proceso (las entradas, modelos del estado-espacio, funciones de transferencia, rendimientos, etc.) y conexiones entre los iconos (qué se hace dibujando una línea que conecta los iconos). Una vez el diagrama del bloque es construido, uno tiene que especificar los parámetros en los varios bloques, por ejemplo la ganancia de una función del traslado.

Para usar SIMULINK el estudiante debe comenzar una sesión de MATLAB (pulse el botón en el botón de MATLAB). Una vez MATLAB ha puesto en marcha, se puede escribir `simulink` (letras minúsculas!) en la línea de comando de MATLAB seguido por ENTER; también puede dar click directo en el icono de Simulink que se encuentra en la barra superior de trabajo de MATLAB. Una ventana de SIMULINK debe aparecer brevemente, con los iconos siguientes: Fuentes, Fregaderos, Discreto, Lineal, Nonlinear, Conexiones, los Extras (dependerá si existe más ventana de la versión del programa).



Sources

Sinks

Discrete

Linear

Nonlinear

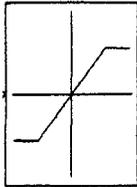
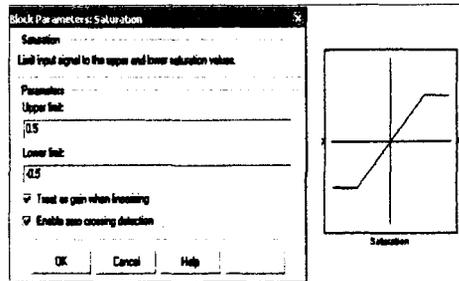
Connections

Extras

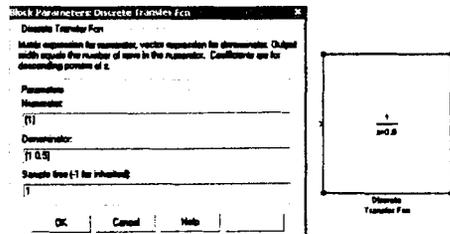
Después vaya al menú archivo en esta ventana y escoge Nuevo para empezar construyendo la representación de diagrama de bloque del sistema de interés.

A continuación enlistaremos cada icono utilizado en nuestro diagrama de bloque, especificando su funcionamiento y principal parámetro de control.

Saturation: Es usado con la finalidad que la salida no sea superior e inferior a los valores pre - establecidos. Los parámetros principales de configuración de este bloque son: límite superior y límite inferior que son los máximos valores permitidos de salida.



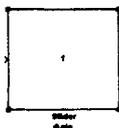
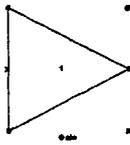
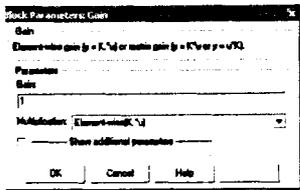
Transfer Fcn: Este bloque nos facilita una Función de transferencia con una ganancia K y un polo. Los parámetros principales de este bloque son la ganancia del numerador K, y los dos valores del denominador que selecciona la posición del polo. Este bloque



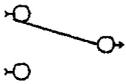
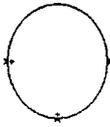
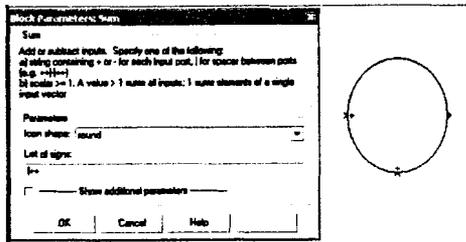
ha sido utilizado en la tesis con dos finalidad: controlador PI y filtro de señales de entrada.

Gain: Este bloque multiplica la señal del entrada por el valor que haya sido predeterminado. El parámetro principal de este bloque es la ganancia que puede ser: positiva, negativa o quebrados. En la tesis es utilizada en muchos casos como: adaptación de señales, amplificaciones de señales, conversiones y ajustes.

Slider Gain: Este bloque tiene la misma característica del bloque Gain, multiplica la señal de entrada por el valor predeterminado, pero este bloque tiene la cualidad de variar su valor de ganancia on - line en el rango pre - establecido. Los parametros principales que se varían son: valor máximo y valor mínimo; dentro de este rango se puede modificar la ganancia. En la tesis es utilizado para seleccionar el set point deseado.



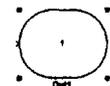
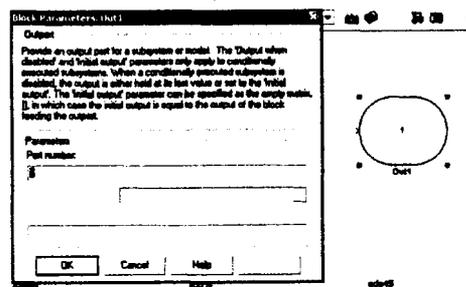
Sum: El bloque sum es usado para sumar dos señales. Su principal parámetro de modificación es la cantidad de sumatorias que se desea, esto se especifica colocando la cantidad de signos + como sumando se tenga dentro del sistema; también se puede colocar signos -. En la tesis es utilizado como sumador y comparador.



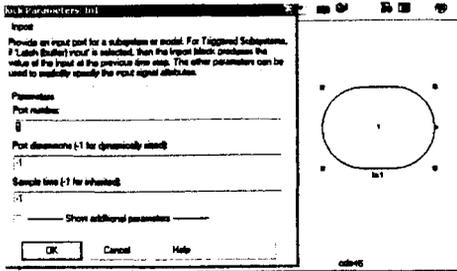
Manual Switch

Switch: Este es un selector de señales manual, escoje entre dos señales y el cambio se realiza dando doble clic sobre el mismo on – line. No tiene parámetros de modificación y es usado en la tesis para seleccionar entre manual y automático.

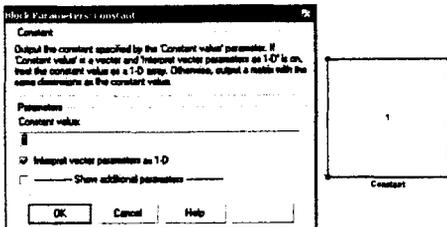
Outport: Es un puerto de salida muy utilizado para realizar bloques de agrupaciones. El puerto de salida siempre trabaja junto con un puerto de entrada en los bloques de agrupación y el parámetro a modificarse es precisamente el número del puerto.



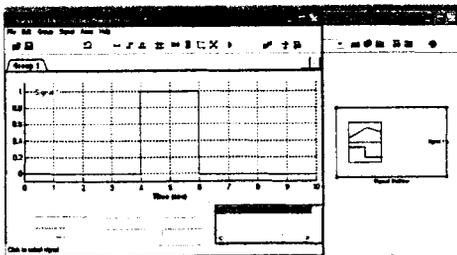
Inport: Es una entrada para sub – subsistema y modelos, es el complemento del outport y es usado en nuestra tesis en los bloques de agrupación. Su parametro de modificación principal es le número del puerto.



Constant: Este bloque entrega una valor constants que puede ser utilizada en cualquier operación matemática o como valores especificao de algún sistema. Su principal parámetro de modificación es el valor de la contante que puede set cualquier número real.



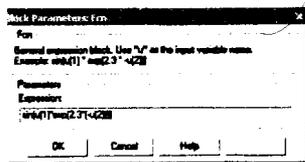
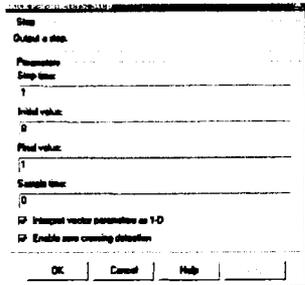
Signal Builder: Este es un constructor de señales, es muy utilizado para simular perturbaciones, variando tiempo y amplitud de la perturbación. Su parámetro principal es la curva de señal que se puede construir con la ventana de ayuda que se muestra junto al bloque donde se define tiempo y amplitud de la perturbación. En la tesis es usada para simular una perturbación con la finalidad de

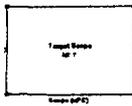
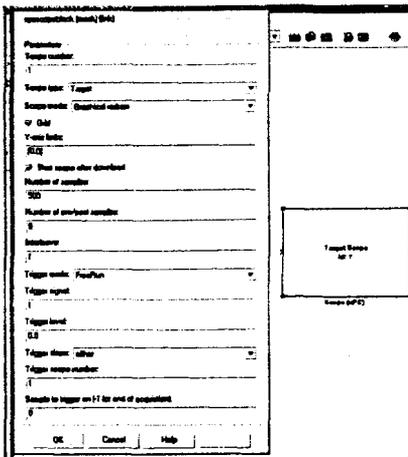


poder obtener la función de transferencia del sistema bajo variación del mismo.

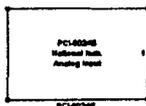
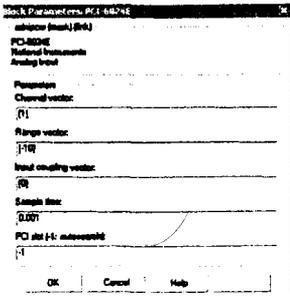
Step: Este bloque envía una señal tipo escalón. Sus parámetros principales de modificación son: el tiempo de ingreso de la señal y la amplitud del mismo (valor máximo y valor mínimo). Es usado también como perturbación pero de un sólo paso.

Fcn: Este bloque es utilizado para escribir funciones matemáticas, el cuál toma como valor de la variable a la señal que ingresa al bloque. El parámetro principal de modificación es la función, que puede ser cualquier (incluso trigonométricas) y es usada dentro de la tesis para realizar conversión de señales.

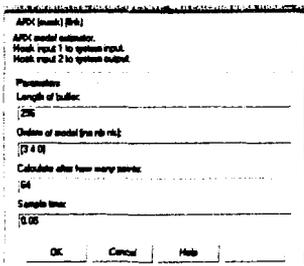




Slope: El bloque del Osciloscopio, nos permite visualizar una señal de simulik. Los parámetros principales de modificación son: forma de presentar la señal, número de muestra tomadas, modo de disparo.



PCI-6024E: Este bloque simula la tarjeta de ingreso y salida de señales National Instrument 6024E. Por medio de este bloque se realiza la interface de entrada y salida de señales entre simulink y el sistema físico. Sus principales parámetros son el canal o puerto y el rango de trabajo.



ARX: Este bloque nos permite identificar la funcione de transferencia de un sistema, tomando datos de entrada y salida del mismo al momento de variaciones de la variable de cobtrol. El bloque es el método por auto - regresión, obteniendose la función de transferencia y el ruido del sistema.

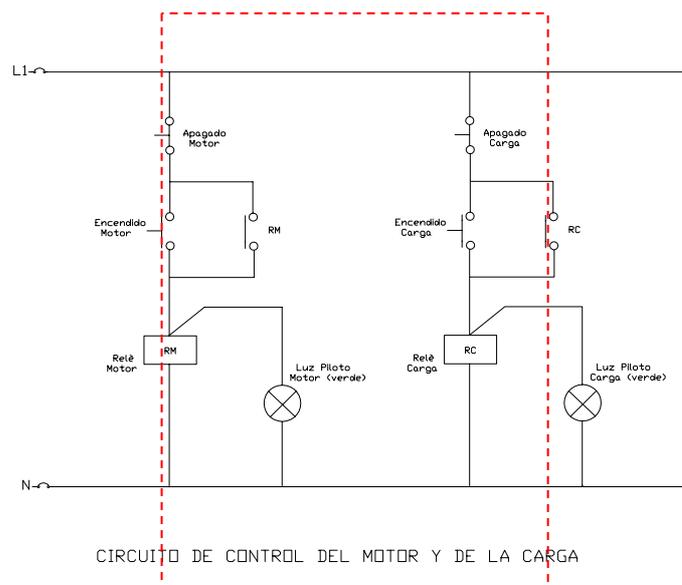
ANEXO C

Diagrama Eléctrico del control del proyecto.

El proyecto consta e ciertos circuitos eléctricos y electrónicos que nos han permitido controlar el sistema así como adecuar, amplificar y proteger señales de control y retroalimentación. A continuación enlistaremos los circuitos de control y señales que encontramos dentro de la tesis, así como una breve descripción del funcionamiento de los mismos;

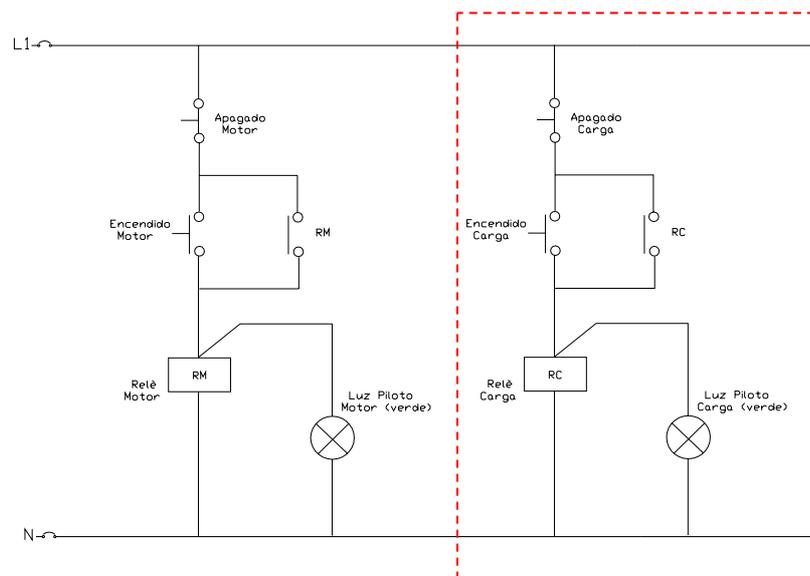
Nota: Los diagramas se encuentra adjunto en archivos de AUTOCAD e impresos.

C.1 Arranque del motor (control)



Este circuito eléctrico de control es el encargado de encender y apagar el motor trifásico, que realiza la fuerza motriz hacia el generador. Consta de una botonera doble con botón de arranque y parada, pulsando la botonera de encendido se energiza la bobina de 110 V del contactor de control del motor, enclavándose con un contacto auxiliar normalmente abierto en paralelo a la botonera de encendido, al mismo tiempo se energiza la luz piloto de color verde. Para detener el circuito se encuentra la botonera de apagado en serie a todo el circuito, al pulsarlo se desenergiza volviendo los contactos a su posición normal y esperando un nuevo pulso del botón de encendido.

C.2 Arranque de la carga (control)



CIRCUITO DE CONTROL DEL MOTOR Y DE LA CARGA

Este circuito eléctrico de control es el encargado de encender y apagar la carga del sistema, que realiza la perturbación externa al generador. Consta de una botonera doble con botón de arranque y parada, pulsando la botonera de encendido se energiza la bobina de 110 V del contactor de control del motor, enclavándose con un contacto auxiliar normalmente abierto en paralelo a la botonera de encendido, al mismo tiempo se energiza la luz piloto de color verde. Para detener el circuito se encuentra la botonera de apagado en serie a todo el circuito, al pulsarlo se desenergiza volviendo los contactos a su posición normal y esperando un nuevo pulso del botón de encendido.

Estos sistemas de control son cableados a nivel de voltaje de 110 V, con cable número 14 AWG, el usuario sólo deberá comandar el sistema por medio de las botoneras dobles que se encuentran en la parte frontal del tablero, y observando su funcionamiento con los indicadores de luces pilotos.

ANEXO D

Diagrama Eléctrico de fuerza del proyecto

El proyecto consta e ciertos circuitos eléctricos de fuerza que nos han permitido controlar el sistema y poder manejar corrientes de hasta 3 amperios. A continuación enlistaremos los circuitos de fuerza que encontramos dentro de la tesis, así como una breve descripción del funcionamiento de los mismos;

Nota: Los diagramas se encuentra adjunto en archivos de AUTOCAD e impresos.

D.1 Arranque del motor (fuerza)

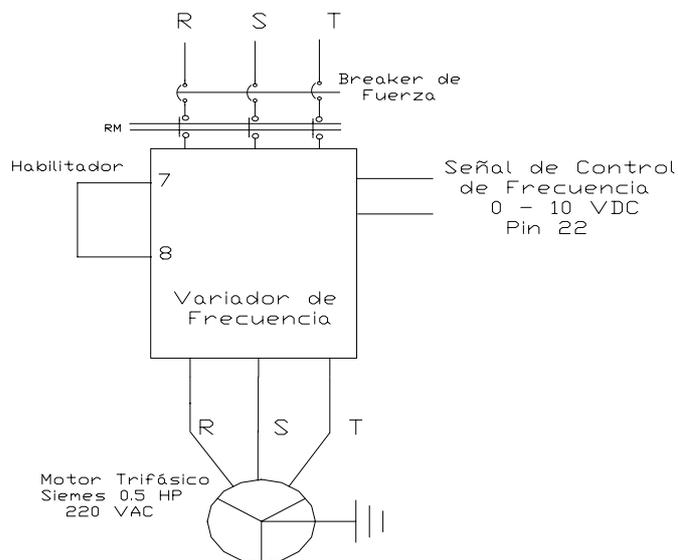


DIAGRAMA DE FUERZA DEL MOTOR

En el anexo C.1 se explicó el funcionamiento del circuito de control comandado con una botonera doble en la parte frontal del tablero de control, al accionarse el contactor del motor los contactos Rm se cierran lo cuál energizan al variador de frecuencia que es el encargado de enviar la energía eléctrica la motor trifásico AC para producir su movimiento. Al estar energizado al variador este espera que le llegue la señal de 0 a 5.5 VDC en su puerto de control; esta señal enviada por el circuito electrónico y controlada por el computador.

El variador tiene los pines 7 y 8 que son los que habilitan al variador, esto pines se encuentran conectados directamente para permitir el trabajo del variador.

Una vez que se desenergize el contactor del motor, también se desenergizan el variador deteniéndose el motor. Cabe indicar que aunque el variador esté encendido si no existe una señal de control mayor de 0 VDC, el motor no producirá movimiento y mientras mayor el voltaje de control mayor velocidad tendrá el motor.

D.2 Arranque de la carga (fuerza)

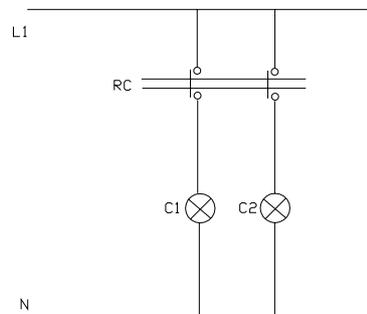


DIAGRAMA DE FUERZA DE LA CARGA

El circuito de fuerza de la carga está conformado por dos contactos del contactor RC. En el anexo C.2 se explicó el funcionamiento del circuito de control comandado con una botonera doble en la parte frontal del tablero de control, al accionarse el contactor de la carga los contactos RC se cierran lo cual energizan las cargas individuales.

Una vez que se desenergice el contactor de la carga, se desenergiza las cargas del sistema.

D.3 Arranque del generador y tacómetro (fuerza)

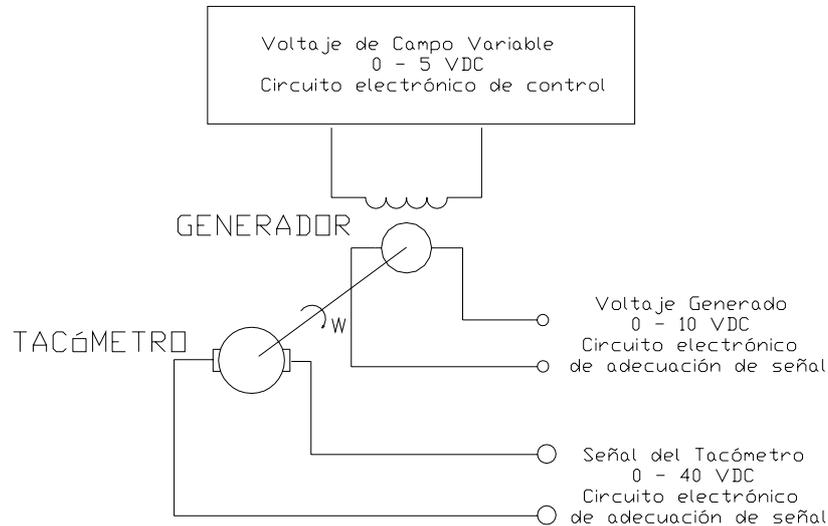


DIAGRAMA DE FUERZA DEL GENERADOR Y TACOMETRO

Para el funcionamiento del generador se necesita dos condiciones:

- 1.- Movimiento en el rotor.- esto se logra por medio del movimiento mecánico del motor trifásico de corriente alterna.
- 2.- Voltaje en el devanado de campo.- suministrado por medio del circuito electrónico de fuerza, que se encuentra en la placa electrónica.

Dada estas dos condiciones en el generador se inducirá un voltaje conocido como voltaje generado, el cual será controlado por el sistema en el computador.

El tacómetro, sensor de velocidad del sistema, se conecta físicamente por medio de una polea que transfiere el movimiento del motor. Como este equipo consta internamente con un campo magnético, generado por imanes permanentes, tan sólo al presentarse movimiento en el eje del tacómetro este envía una señal de voltaje directamente proporcional con la velocidad de su eje. Esta señal es entre 0 y 40 VDC que luego de pasar por el circuito electrónico de adecuación de señal ingresa al computador.

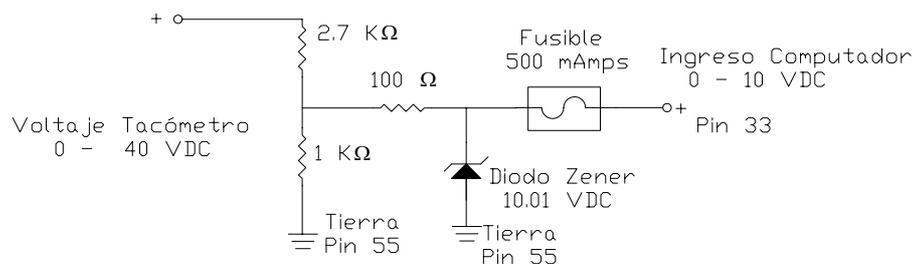
Anexo E

Diseño del sistema electrónico de control (Interfase sistema físico con sistema lógico)

El proyecto consta e ciertos circuitos electrónicos que nos han permitido controlar el sistema así como adecuar, amplificar y proteger señales de control y retroalimentación. A continuación enlistaremos los circuitos electrónicos que encontramos dentro de la tesis, así como una breve descripción del funcionamiento de los mismos;

Nota: Los diagramas se encuentra adjunto en archivos de AUTOCAD e impresos.

E.1 Adecuación de señal del tacómetro

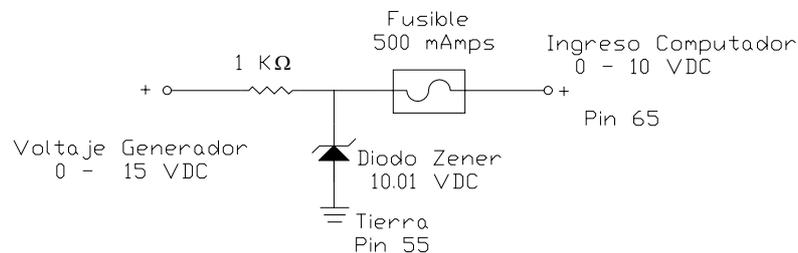


Adecuación de Señal del Tacómetro

Por medio de este circuito se logra adecuar la señal de salida del tacómetro que está entre 0 – 40 VDC a la señal de ingreso del computador que es de 0 – 10 VDC. Para ello se utiliza un divisor de

voltaje y un sistema de protección por medio de una resistencia de 100Ω (limitadora de corriente) y un diodo zener de 10.01 VDC. Además se ha colocado un fusible tubular de vidrio de 500 mA. Esta señal ingresa por el pin 33 de la tarjeta.

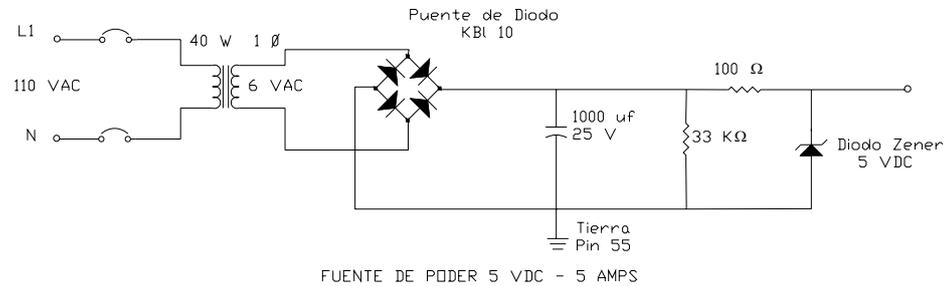
E.2 Adecuación de señal del Voltaje Generado



Adecuación de Señal del Generador

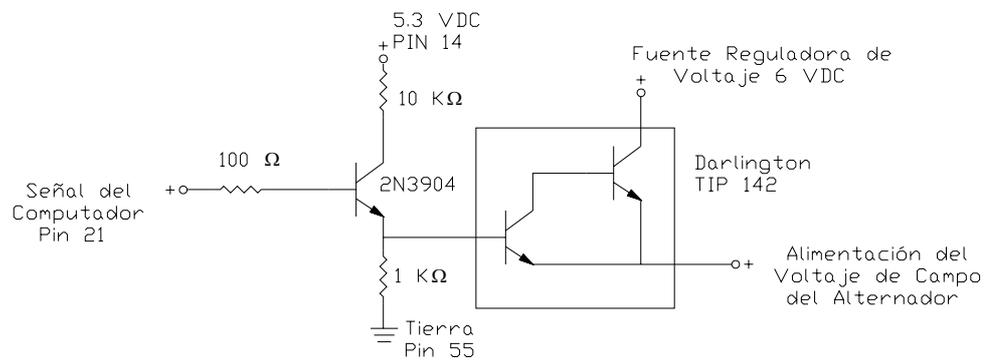
Por medio de este circuito se logra adecuar la señal de salida del generador que está entre 0 – 15 VDC, este sistema no tiene divisor de voltaje, la señal ingresa directo lo si tiene es un sistema de protección por medio de una resistencia de $1 \text{ K}\Omega$ (limitadora de corriente) y un diodo zener de 10.01 VDC. Además se ha colocado un fusible tubular de vidrio de 500 mA. Esta señal ingresa por el pin 65 de la tarjeta. En caso de que se desee controlar un nivel de voltaje generado mayor, en este circuito es donde se debe hacer los cambios instalando un divisor de voltaje, ya que al computador sólo puede ingresar hasta 10 VDC.

E.3 Fuente de alimentación (5 VDC)



Para poder alimentar el circuito electrónico y entregar la potencia suficiente para generar el flujo magnético de devanado de campo del alternador, se construyó una fuente de 5 VDC – 3 Amps. La fuente consta de un puente de diodo y un capacitor, así como un diodo zener para estabilizar el voltaje de salida a 5 VDC. El transformado es alimentado por 100 VAC, del circuito de control de la maqueta, el cual se puede seccionar por medio del broker de control del sistema físico (se explica en el anexo F)

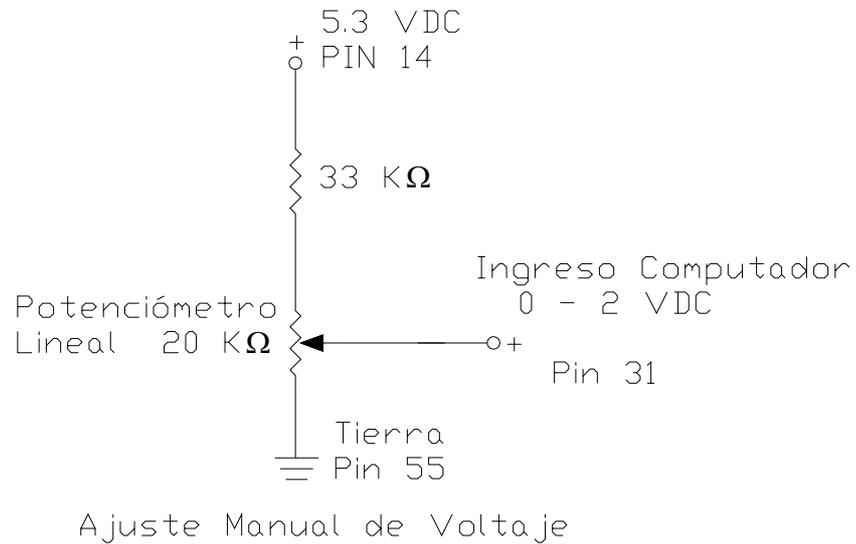
E.4 Amplificación del voltaje de campo



Amplificación del Voltaje de Campo del Alternador

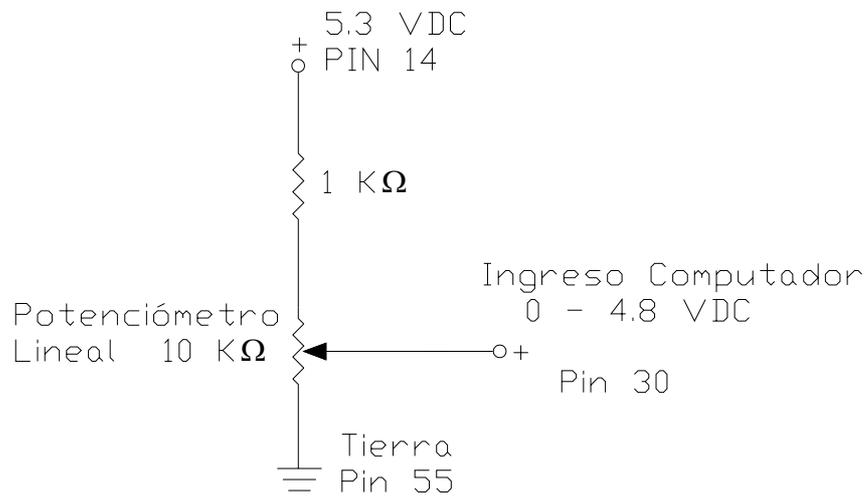
Para poder ingresar el nivel de voltaje correcto al devanado de campo del generador, el sistema lógico envía una señal de voltaje variable; esta variación depende del estado del valor real con respecto al set point. Sin embargo la tarjeta sólo nos puede ofrecer valores menores a 1 Amp. y lo que consume el generador son valores superiores de 2 Amps; para ello se diseñó un circuito de amplificación de señal. Este circuito consta de dos etapas de amplificación: la primera por medio de un transistor común 2N3904, NPN, de donde se toma la señal del emisor y cuya pre-amplificación ingresa al transistor darlington que realiza la amplificación de potencia obtenido a la salida del circuito un voltaje entre 0 – 4 VDC y con una corriente entre 1.5 y 3 Amps. Para ello el rango del voltaje de base de la etapa de pre-amplificación varía entre 1.8 y 4.5 VDC (señal enviada por el computador). Los dos integrados están trabajando en su zona lineal, requisito para poder realizar un buen control del voltaje de campo del generador.

E.5 Ajuste Manual de Voltaje



Los sistemas de ajuste manual, son diseñado por medio de una resistencia y un potenciómetro, tomando como alimentación los 5.3 VDC de la tarjeta de xPCTarget. Este divisor de voltaje que se forma es el que ingresa la señal al computador y internamente se adecua par llevar el control manual de la variable de voltaje generado. Como el máximo voltaje de ingreso no supera lo 10 VDC, este circuito no lleva diodo zener de protección. Cabe recalcar que el potenciómetro es de multi-vueltas para poder realizar una variación de voltaje más exacta y lineal.

E.6 Ajuste Manual de Frecuencia

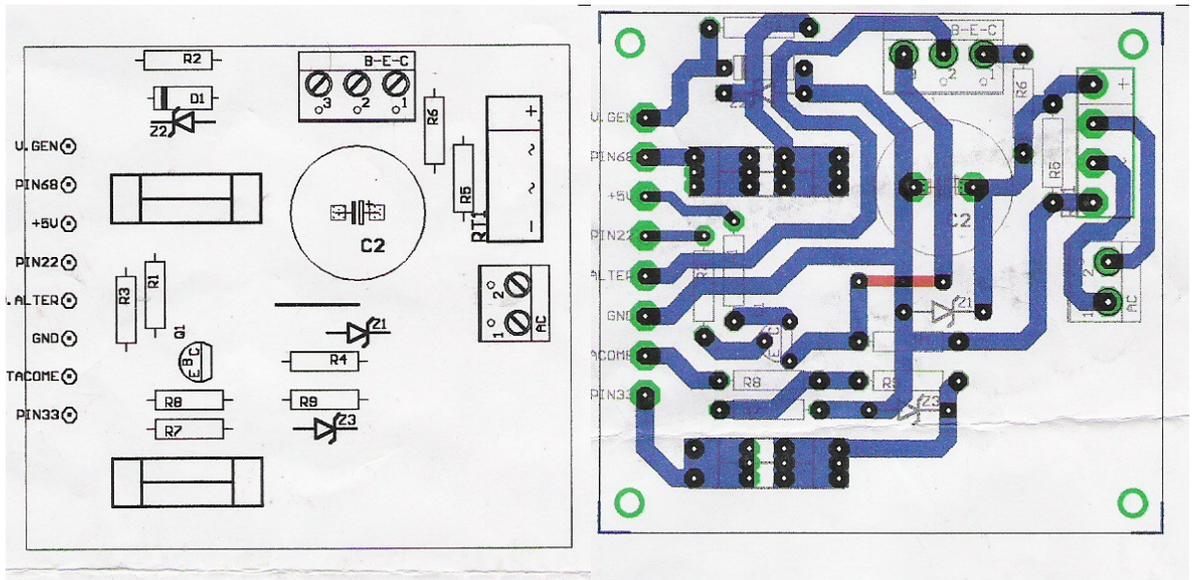


Ajuste Manual de Frecuencia

Igual que el caso anterior el sistemas de ajuste manual, son diseñado por medio de una resistencia y un potenciómetro, tomando como alimentación los 5.3 VDC de la tarjeta de xPCTarget. Este divisor de voltaje que se forma es el que ingresa la señal al computador y internamente se adecua par llevar el control manual de la variable de la frecuencia generada. Como el máximo voltaje de ingreso no supera lo 10 VDC, este circuito no lleva diodo zener de protección. Cabe recalcar que el potenciómetro es de multi-vueltas para poder realizar una variación de voltaje más exacta y lineal.

Todos estos circuitos electrónicos, han sido agrupados en baquelita y soldadas, siendo el único contacto con el usuario la borneras de conexión. A

continuación se encuentran los diseños de la ubicación de los equipos y de las pistas de la plaqueta.



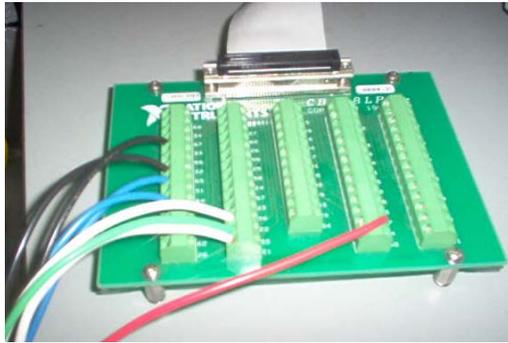
Por medio de estos circuitos electrónicos se crea el bloque de interfase entre el sistema físico y el sistema lógico, adecuando señales con lo cual se evita el daño de la tarjeta electrónica y para poder trabajar bien con los equipos físicos.

ANEXO F

Diseño Estructural (Mesa de Trabajo).

En este anexo realizaremos un registro fotográfico de todas las partes del sistema, para el re fácil reconocimiento de los próximos usuarios.

EQUIPO	DESCRIPCIÓN
	Lo que se observa es el proyecto completo que consta de: dos computadores, un juego de borneras, el sistema físico.
 <p data-bbox="347 1570 528 1641">Computador de Campo</p> <p data-bbox="639 1570 820 1641">Computador Central</p>	El sistema lógico consta de dos computadores. En el computador del lado derecho es donde se encuentra el sistema lógico y está encargado de controlar todo el proyecto. El computador del lado izquierdo el computador de campo, quién toma los datos de campo y los envía por vía de TCP/IP al computador central



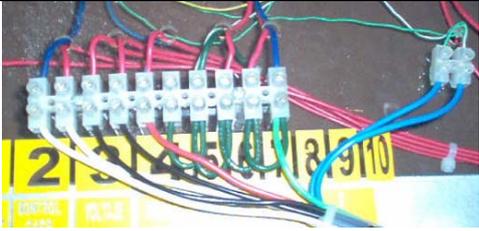
Tarjeta e borneras que permite conectar las señales de campo hacia el computador, se comunica con el computador por un bus de datos de 25 hilos, hacia la tarjeta Pc - Target

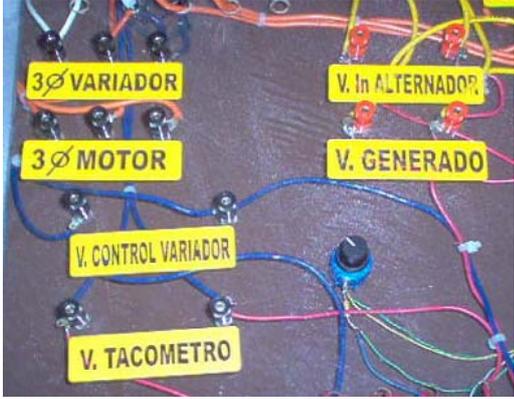


Sistema físico completo, donde las señales de control del sistema lógico (computador), logran dar movimiento a todos estos equipos que nos permite generar de voltaje y frecuencia que deseamos



Tarjeta electrónica que realiza las adecuación de las señales que ingresarán al sistema lógico para evitar daños en la misma por sobre voltaje y el sistema de potencia de las señales que salen del computador al campo para aumentar a la corriente necesaria

	<p>Borneras de campo donde se comunica la señales de ingreso y salida del sistema físico</p>
	<p>Cargas para el sistema de generación. Consta de tres focos de los cuales la carga 1 está siempre encendida y la carga dos y tres ingresan en el momento que desee el usuario por medio del contactor de cargar</p>
	<p>Botonera de encendido y apagado del motor y de la carga. Cada uno de ellos consta de una luz piloto que permite confirmar el accionamiento.</p>
	<p>Contactores de motor y carga que se accionan al momento de pulsar las botoneras de encendido y apagado</p>

	<p>Plataforma toma muestra, donde le usuario puede conectar equipos de medición para conocer los valores de voltaje que se encuentra en el campo, tales como: Voltaje en el motor, voltaje en el variador, voltaje de ingreso al variador, voltaje de salida del generador, voltaje de control de variador y voltaje de salida del tacómetro</p>
	<p>Potenciómetro de ajuste manual. El potenciómetro derecho es ajuste de frecuencia y el izquierdo es ajuste de voltaje</p>
	<p>Transformador del sistema electrónico, disminuye de 110 V AC a 6 VAC para alimentar al sistema electrónico</p>



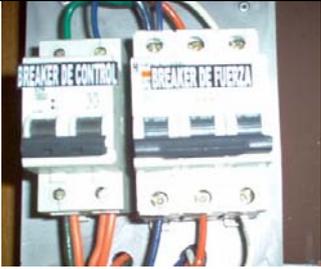
Tacómetro del sistema, encargado de enviar una señal eléctrica proporcional a la velocidad del sistema.



Alternador es el equipo que por medio de las señales de ingreso, velocidad y voltaje de campo, logra generar voltaje y frecuencia del sistema físico.



Variador de frecuencia que es el equipo que controla la velocidad de motor trifásico

	<p>Motor trifásico que proporciona la fuerza motriz del sistema físico, lo cuál es trasmitido por bandas a los otros equipos que necesiten movimiento</p>
	<p>Alimentación trifásica que le proporciona de energía eléctrica al sistema físico</p>
	<p>Breakers de control y fuera del sistema físico</p>

Estos son lo equipos y elementos que trabajan en nuestro proyecto, las características físicas de cada uno y el funcionamiento global del sistema se encuentra en el capítulo 3.

ANEXO G

Prácticas de Laboratorio

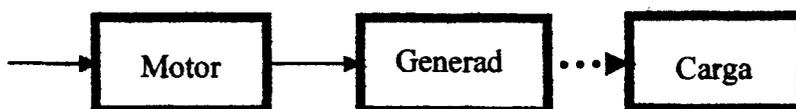
Práctica 1: Análisis de estabilidad teórica

- **Objetivo**

- Conocer como realizar una simulación con ayuda de SIMULINK de un sistema real.
- Saber interpretar las curvas obtenidas del sistema simulado conociendo sus diferencias.
- Obtener la función de transferencia teórica de un circuito de generación de voltaje y frecuencia; identificando el lazo cruzado.

- **Introducción y Teoría**

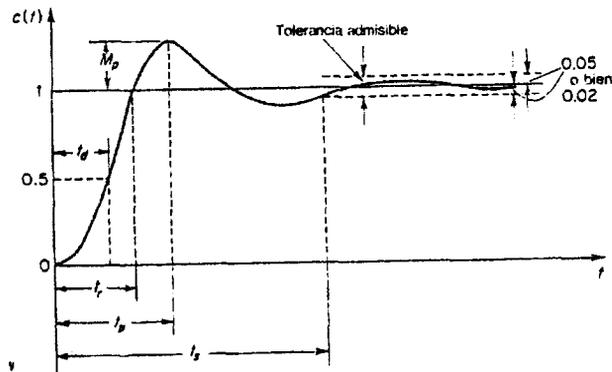
El objetivo de nuestra práctica es conocer el comportamiento un sistema de generación de energía eléctrica, para ello necesitamos dos equipos principales el motor y el generador. El motor será el responsable de proporcionar la fuerza motriz del eje del generador que para nuestro caso utilizaremos un alternador de carro.



Acordémonos que la función de transferencia teórica se obtiene relacionando una entrada del sistema con una salida del sistema, como nuestro sistema tiene dos variables a controlar (voltaje y frecuencia generada), por medio de dos variables de control (velocidad de motor y voltaje de campo del generador), debemos tener cuatro relaciones de variables y dos relaciones de perturbación que nos producirán seis curvas características que son:

1. Voltaje Generado Variando Velocidad
2. Frecuencia Generada Variando Velocidad
3. Voltaje Generado Variando Voltaje de Campo
4. Frecuencia Generada Variando Voltaje de Campo
5. Voltaje Generado Variando Perturbación (IL)
6. Frecuencia Generada Variando Perturbación (IL)

Cuando existe varias variables la mejor forma de identificar el comportamiento del sistema, es realizarla modificando una variable y manteniendo constante la otra. Así podremos obtener la curva característica entre ellas, dichas curvas serán observadas para determinar sus parámetros de control como son: tiempo de estabilización, tiempo de subida, estabilidad de la señal, sobre nivel porcentual, etc. como se muestra en la siguiente figura.



Donde:

Td: Tiempo de retardo

Tr: Tiempo de crecimiento (time rise)

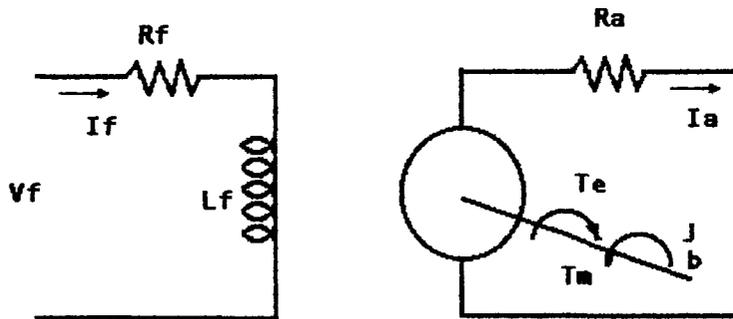
Tp: Tiempo pico (time settling)

Mp: Sobreimpulso máximo (over shoot)

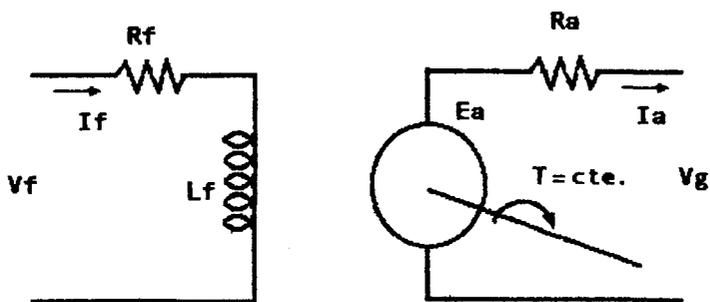
Ts: Tiempo de estabilización, cuando los valores están + 5% / - 2 % del valor setead

- **Pre-práctica**

1. Encuentre la función de transferencia teórica de un motor de inducción DC, según el siguiente esquema de la figura.



2. Encuentre la función de transferencia de un generador DC con excitación separada como se muestra en la figura.



3. Obtenga de forma teórica las funciones de transferencia de las perturbaciones del motor y generador, tomando como premisa que esta perturbación es causada por la corriente de carga del generador.

4. Con la funciones de transferencia antes obtenida, unificar todo el sistema obteniendo una forma de sistema de dos variables:

$$V_g = f(V_c, V_{in}) = K_1 V_c + K_2 V_{in}$$

$$F_g = f(V_c, V_{in}) = K_3 V_c + K_4 V_{in}$$

- **Práctica**

- **Materiales:**

- Computador (Sistema de Control MARLAB)

- **Parámetro de equipos a utilizar**

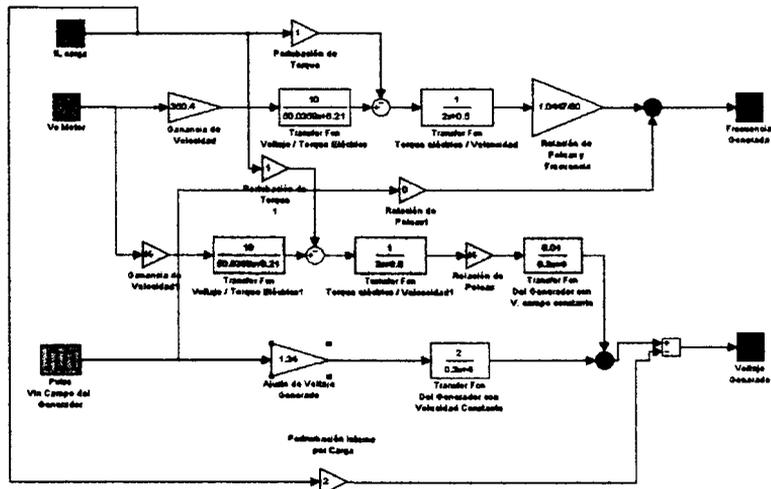
Para poder realizar un trabajo didáctico se ha decidido utilizar los siguientes parámetros reales de cada equipo:

MOTOR:	Motor DC con los siguientes parámetros: Km: 10 N.m/Amp Ra: 50.0359 ohm LF: 6.21 H J: 2 N.m.s ² /rad b: 5 N.m.s
GENERADOR:	Alternador de carro con regulador de voltaje externo: K'': K' .Wg = 2 Rf: 4 ohm Lf: 0.03 H K''': K' . Vf =0.01 P: 2
CARGA:	3 Focos en paralelo de carro de 12 V - 0.83 Amps

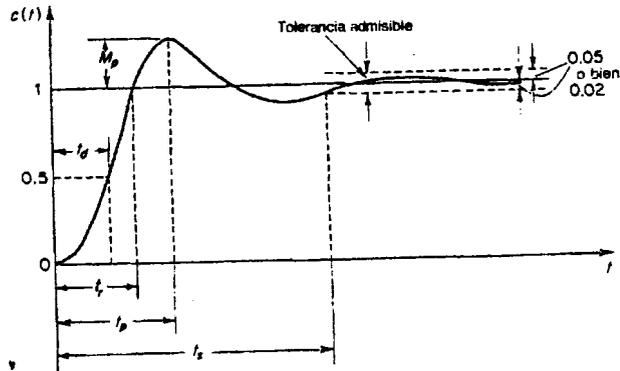
	RL: 4.8 ohm
CONSTANTES DE RELACIONES Y AMPLIFICACIONES	K1: 350.4 (Amplificación de voltaje generado) K2: 1 (Amplificación voltaje de campo) K3: 1.0447 (Relación de poleas)

● **Pasos de Instalación del sistema**

1. En el computador abra el programa de MATLAB y busque dentro de las carpeta de prácticas el programa de SistemTeórica:



2. Manteniendo el tren de pulso en la variable de control que desee que modificar y la otras variable en cero, observar la curva característica de voltaje y frecuencia obtenida Mp y Ts.



Donde:

M_p : Sobreimpulso máximo (over shoot)

T_s : Tiempo de estabilización, cuando los valores están + 5% / - 2 % del valor seteado

3. Repetir los pasos 2 y 3 para todas las relaciones de variables que son:

1. Voltaje Generado Variando Velocidad
2. Frecuencia Generada Variando Velocidad
3. Voltaje Generado Variando Voltaje de Campo
4. Frecuencia Generada Variando Voltaje de Campo
5. Voltaje Generado Variando Perturbación (IL)
6. Frecuencia Generada Variando Perturbación (IL)

- **Datos a obtener**

Tiempo de estabilización y sobre nivel porcentual obtenido

Relación	Tiempo de Subida (seg)	Tiempo de Estabilización (seg)	Sobre Nivel porcentual (%)
Voltaje Generado Variando velocidad			
Frecuencia Generada Variando Velocidad			
Voltaje Generado Variando Voltaje de Campo			
Frecuencia Generada Variando Voltaje de Campo			
Voltaje Generado Variando Perturbación (IL)			
Frecuencia Generada Variando Perturbación (IL)			

- **Conclusiones y Recomendaciones**

Práctica 2: Desacopladores del sistema

▪ **Objetivo**

- Conocer lo que es un Sistema de variables múltiples.
- Conocer la técnicas con lo cual podemos eliminar los lazos cruzados.
- Obtener los desacopladores para un sistema 2×2 .

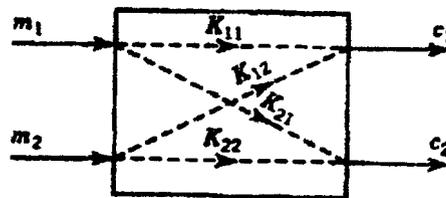
● **Teoría, Control de Procesos Multivariables**

A menudo encontramos procesos en los cuales más de una variable debe ser controlada, ese es el objetivo del control múltiple. En algunos procesos, se puede considerar cada control de variable separado de las otras cuando no interactúan entre ellas. Este sistema se refiere como *sistema de control multivariable* o como sistema de control *múltiple-entrada, múltiple-salida (MIMO)*. El problema que se va a manejar es el *lazo de interacción*. Se debe encontrar la respuesta y estabilidad del sistema multivariable

Selección de variables controladas y manipuladas

Cuando usamos la medida de interacción para seleccionar el par de variables controladas y manipuladas para minimizar el efecto de interacción. Considere el sistema de la figura con dos variables a

controlar, c_1 y c_2 , y dos variables manipuladas, m_1 y m_2 . Se llama a este sistema un sistema 2 x 2. Por lo que se coloca en pares cada variable controlada con la variable manipulada que tiene más "influencia" en ella. En este contexto, *influencia* y *ganancia* tiene el mismo significado; para tomar una decisión, se deben encontrar la ganancia de cada variable manipulada en cada variable controlada.



Ganancias lazo abierto

Las cuatro ganancias de estado estacionario de circuito abierto para un sistema 2 x 2 son:

$$K_{11} = \left. \frac{\Delta c_1}{\Delta m_1} \right|_{m_2} \quad K_{12} = \left. \frac{\Delta c_1}{\Delta m_2} \right|_{m_1}$$

$$K_{21} = \left. \frac{\Delta c_2}{\Delta m_1} \right|_{m_2} \quad K_{22} = \left. \frac{\Delta c_2}{\Delta m_2} \right|_{m_1}$$

Donde K_{ij} es la ganancia relativa de i variable controlada para j variable manipulada. La barra vertical indica que las ganancias son determinadas con los lazos abiertos; esto es, el cambio es hecho en cada variable manipulada mientras la otra variable manipulada permanece constante.

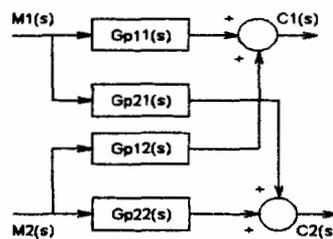
Puede aparecer que las variables controladas y manipuladas podrían ser colocada en pares simplemente comparando las ganancias de lazo abierto. Por ejemplo, si K_{12} fuese mayor en magnitud que K_{11} , entonces m_2 sería escogida para controlar c_1 . Esto no es absolutamente correcto, sin embargo, debido a que las ganancias tienen diversas unidades y no pueden generalmente ser comparadas unas con otras.

La Matriz de Ganancia de Estado Estacionario, (MGEE), es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \end{bmatrix}$$

En la figura se muestra el sistema correspondiente.



Por el método de Bristol obtenemos la matriz de ganancias relativas, (MGR).

$$\mu_{11} = \frac{\partial c_1 / \partial m_1 \big|_{m_2}}{\partial c_1 / \partial m_1 \big|_{c_2}} \approx \frac{\Delta c_1 / \Delta m_1 \big|_{m_2}}{\Delta c_1 / \Delta m_1 \big|_{c_2}} = \frac{K_{11}}{K_{11}}$$

En forma general, elementos sin dimensiones, tenemos los siguientes:

$$\begin{bmatrix} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} \\ \mu_{21} & \mu_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \end{bmatrix} \qquad \mu_{ij} = \frac{\partial c_i / \partial m_j \big|_m}{\partial c_i / \partial m_j \big|_c} = \frac{K_{ij}}{K_{ij}}$$

El numerador es la ganancia de lazo abierto K_{ij} con todas las demás variables manipuladas mantenidas constante. El denominador es la ganancia de lazo cerrado K'_{ij} con todas las demás variables controladas mantenidas constantes, $Dc_2=0$.

Método de Bristol, Matriz de Ganancia Relativa (MGR)

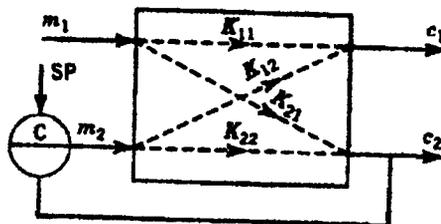
Para calcular la ganancia de lazo cerrado para el par c_1-m_1 , se debe introducir la realimentación de c_2 mediante un controlador para generar m_2 . Si este es un controlador con modo integral, cuando ocurra un cambio en m_1 éste ajustará m_2 para lograr que c_2 se haga cero, en la figura se muestra el diagrama.

$$\begin{bmatrix} \Delta C_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \end{bmatrix}$$

$$\Delta m_2 = -\frac{K_{21}}{K_{22}} \Delta m_1$$

$$\Delta C_1 = K_{11} \Delta m_1 - K_{12} \frac{K_{21}}{K_{22}} \Delta m_1$$

$$K'_{11} = \frac{\Delta C_1}{\Delta m_1} = K_{11} - K_{12} \frac{K_{21}}{K_{22}}$$



La matriz de ganancia relativa es la siguiente:

$$\begin{vmatrix} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}} & \frac{K_{12}K_{21}}{K_{21}K_{12} - K_{11}K_{22}} \\ \frac{K_{21}K_{12}}{21K_{12} - K_{11}K_{22}} & \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \end{vmatrix}$$

Para cualquier sistema nxn, un elemento de la MGR, se calcula la transpuesta de la inversa de la matriz de ganancia de estado estacionario K y se multiplica cada término de la nueva matriz por el término correspondiente en la matriz original. Los términos que se obtienen son los de la matriz de interacción o matriz de ganancia relativa.

$$B = K^{-1}$$

$$\mu_{ij} = B_{ji}K_{ij}$$

Regla para aparear las variables controladas y manipuladas

“Siempre se agrupan por pares los elementos positivos de la MGR más cercanos a 1. La estabilidad de los pares se verifica mediante el teorema de Niederlinski; si el par da origen a un sistema inestable, entonces se elige otro par positivo con valores cercanos a 1, siempre que sea posible, se evitará la agrupación por pares negativos”.

Teorema de Niderlinski, se parte de suponer que los pares propuestos son elementos de la diagonal en la MGEE. El sistema de circuito cerrado que resulta de agrupar por pares m1-c1, m2-c2, ...mn-cn, es inestable si y solo si:

$$\frac{|MGEE|}{\prod_{i=1}^n K_{ij}} < 0$$

Indice de Interacción.

Según Nisenfeld y Shultz para un sistema multivariable, en donde el Índice de Interacción debe ser menor a 1 para evitar la inestabilidad debida a la interacción de los circuitos. Se utiliza la variable manipulada m_j para controlar la variable c_i .

$$I_{ij} = \left| \frac{1 - \mu_{ij}}{\mu_{ij}} \right|$$

Desacoplamiento.

Si se fijan los valores de $D_{11}(s)$ y $D_{22}(s)$ igual a 1, entonces:

$$C_2(s) = [D_{21}(s)G_{p22}(s) + G_{p21}(s)]M_1(s)$$

$$C_1(s) = [D_{12}(s)G_{p11}(s) + G_{p12}(s)]M_2(s)$$

Si las variables controladas tienen que permanecer constantes, sus variables de desviación deben ser cero.

$$0 = [D_{12}(s)G_{p11}(s) + G_{p12}(s)]M_2(s)$$

$$0 = [D_{21}(s)G_{p22}(s) + G_{p21}(s)]M_1(s)$$

El desacoplador queda de la siguiente manera:

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{p12}(s)}{G_{p11}(s)}$$

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{p21}(s)}{G_{p22}(s)}$$

2. Con los datos obtenidos anteriormente, calcule la MGEE (Matriz de Ganancia de Estado Estacionario).

3. Halla la matriz de ganancia relativa (MGR) del sistema en lazo cerrado y seleccione los pares de variables controladas y manipuladas.

4. Hallar el índice de interacción del sistema.

5. Diseñe el desacoplador estático para el sistema

6. Con la matriz de desacoplador obtenida complete el sistema en lazo abierto y observe el comportamiento del sistema con desacopladores.

- **Conclusiones y Recomendaciones**

Práctica 3: Obtención del Controlador para un sistema multivariable

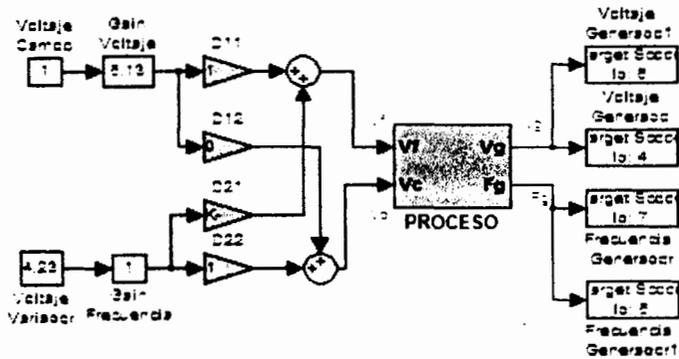
- **Objetivo**

- Aprender dos formas (empírico y analítico) para la obtención de los controladores del sistema.
- Conocer las ventajas y diferencias los controladores obtenidos de forma analítica y empírica.
- Aprender a utilizar la herramienta SISO para el análisis del sistema y obtener el controlador con parámetros de sobrenivel porcentual y tiempo de estabilización requeridos.

- **Práctica**

Cálculo del controlador de forma empírica

- 1 Con el sistema en lazo abierto en el cual se incluye la matriz de acopladores. Mantenga constante el valor del voltaje de campo a cualquier valor y varíe la variable voltaje del variador (V_v) de 0 a 5.



Con la herramienta xpcrctool, en el menú de herramienta, seleccione Target PC Screenshot, el cual permite que capture la imagen que muestra la pantalla del PC remoto. Para este caso se captura la imagen de la curva de frecuencia del generador.

2. Con la curva de frecuencia obtenida en el punto anterior, calcule k_p y

T_i .

Donde:

t_1 a 0.283 de *valor estable*

t_2 a 0.632 de *valor estable*

$$T_i = 3/2 (t_2 - t_1)$$

A_c valor de seteo

A_m valor estable

$$K = A_c / A_m$$

$$PI \Rightarrow \frac{K}{T_i s + 1}$$

3. Obtenga la curva del voltaje generado variando el voltaje de campo de 0 a 3 y manteniendo el voltaje de variador constante a un valor de 4.
4. Con la curva de voltaje generado, calcule los valores respectivos de k y T_i para el controlador como se muestra en la figura 5.3.2.1.5.
5. Con los controladores obtenidos se completa el sistema a lazo cerrado, realice pruebas de variación del Set Point y de perturbación. Anote las observaciones.

Cálculo del controlador con la herramienta SISO

Para determinar los controladores, primero se va a calcular el controlador para el sistema F_g/V_c para luego calcular el controlador del sistema V_g/V_c .

- **Controlador PI del sistema F_g/V_c**

- 1 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>> load motor
```

En este paso se carga en el workspace los datos de las variables f_g (frecuencia generada, señal de salida) y v_c (voltaje de control,

señal de entrada) para determinar la función de transferencia por medio de System Identification.

2 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>> ident
```

3 En la lista *Preprocess* seleccione la opción **Quick Start**, el cual en la tabla de datos se cargan los datos: *motord*, que son los datos sin constante de nivele; *motorde* que es una porción de los datos los cuales System los va a utilizar para la estimación del modelo; *motordev* el cual es la siguiente porción de los datos con los cuales se va a realizar la validación del modelo que genera System.

4 De la lista *Estimate* seleccione la opción **Quick Start**, esta opción realiza la estimación del modelo matemático del sistema, en la tabla de los modelos se cargan la respuesta al impulso (imp), la respuesta de frecuencia del sistema (spad) y los modelos para un sistema discreto (arxqs) y para un sistema continuo (n4s2).

5 lleve el modelo n4s2 al workspace.

6 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>>[num,den]=tfdata(n4s2,'v')
```

7 La función de transferencia del modelo estimado está dada en Transformada Z, para guardar en una variable la función de transferencia se escribe lo siguiente:

```
>>zmotor=tf(num,den,0.1)
```

8 Pase la función la función de transferencia a Transformada de Laplace con el nombre **smotor**

9 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>>sisotool(smotor)
```

10 Determine el controlador con un sobre nivel porcentual $< 5\%$ y un tiempo de estabilización < 8.5 s.

- **Controlador PI del sistema V_g/V_f**

1 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>> load generador
```

En este paso se carga en el workspace los datos de las variables v_g (voltaje generado, señal de salida) y v_f (voltaje de campo, señal de entrada) para determinar la función de transferencia.

2 Siga los pasos 2 hasta el 5 muestrados para el sistema F_g/V_c colocando en *Input* la variable v_f y en *Output* la variable v_g .

3 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>>[num,den]=tfdata(n4s1,'v')
```

4 Guarde la función de transferencia en la variable $z_{\text{generador}}$:

5 Pase la función de Transformada Z a Transformada de Laplace, en la variable $s_{\text{generador}}$:

6 En la ventana de comandos de MatLab escriba:

```
>>sisotool(sgenerador)
```

7 Determine el controlador con un tiempo de estabilización < 2.54 s,

- **Conclusiones y Recomendaciones**

ANEXO H

Tablas de Datos

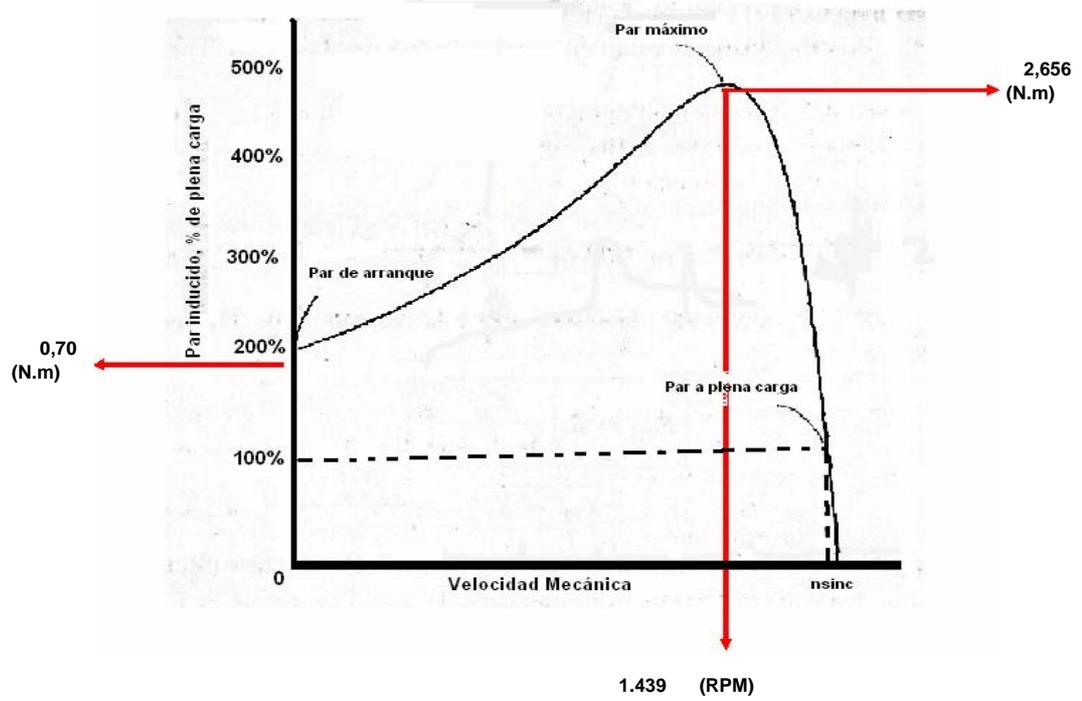
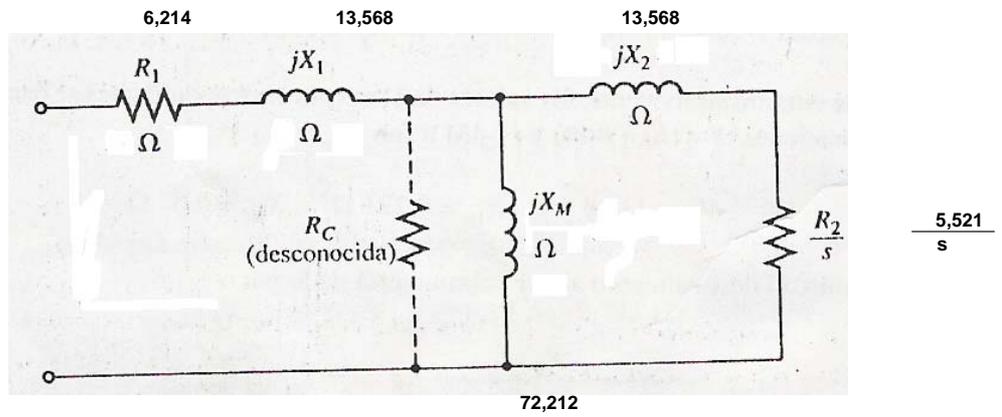
Tabla de Datos de Campo modificando la variable de control de frecuencia

Voltaje de Control del Variador (VDC)	Frecuencia del Variador (Hz)	Velocidad del Motor (rpm)	I armadura del motor (Amps)	Velocidad del Alternador (rpm)
0	0	0	0,3	0
0,5	0,49	100	1,4	105
1	9,98	260	1,3	269
1,5	15,5	427	1,5	442
2	21,08	542	1,5	615
2,5	26,78	760	1,5	790
3	32,5	930	1,5	966
3,5	37,9	1097	1,5	1139
4	43,65	1265	1,6	1313
4,5	49,28	1431	1,6	1487
5	54,8	1600	1,55	1662
5,5	60	1752	1,5	1819

Frecuencia Alternador (Hz)	Velocidad del Tacómetro (rpm)	Voltaje del Tacómetro (VDC)	Voltaje del Computador (VDC)	Voltaje Generado Vcampo = 1,5 V
0,00	0	0	0	0
1,75	55,7	2,19	0,57	0
4,48	141	5,7	1,55	0,03
7,37	235	9,28	2,55	0,55
10,25	326	13	3,56	1,25
13,17	418	16,7	4,95	1,99
16,10	512	20,4	5,7	2,7
18,98	605	24,2	6,6	3,8
21,88	696	28	7,6	4,6
24,78	790	31,8	8,7	5,4
27,70	883	35,4	9,7	6,2
30,32	967	38,8	10,1	6,9

Tabla de datos de Campo variando la variable de control de voltaje

Variable de Control de Voltaje	Voltaje de campo (VDC)	Voltaje generado (VDC)	Corriente de carga 1 (Amps)	Corriente de carga Total (Amps)
1,8	0,24	0,062	0,00	0,01
2	0,39	0,510	0,01	0,04
2,25	0,56	1,503	0,04	0,12
2,5	0,73	2,714	0,07	0,22
2,75	0,97	3,950	0,11	0,32
3	1,26	5,460	0,15	0,44
3,25	1,49	6,720	0,18	0,55
3,5	1,69	7,853	0,21	0,64
4	2,1	9,580	0,26	0,78
4,25	2,31	9,840	0,27	0,80



Circuito Equivalente de un Motor de Inducción

Datos de Placa del Motor

Potencia (HP)	0,5	Clase de diseño (DE, A, B, C, D)	A
Números de Polos	2		
Voltaje (V)	208		
Frecuencia (Hz)	60	Tipo de Conexión (Estrella, Delta)	Estrella
I nominal (Amps)	1,4		

Datos de pruebas de Campo

Prueba DC

Vdc (V)	17,4	Idc (Amps)	1,4
---------	------	------------	-----

Prueba en Vacío

Vt (V)	208	F (Hz)	60
Ia (Amps)	1,4	Pin, In (w)	75
Ib (Amps)	1,41		
Ic (Amps)	1,39		

Prueba a rotor Bloquetado

Vt (V)	71,69	F (Hz)	60
Ia (Amps)	1,4	Pin (w)	69
Ib (Amps)	1,41		
Ic (Amps)	1,39		

De la prueba DC

$$R1 = Vdc / 2 * Idc \quad 6,214 \text{ (Ohmios)}$$

De la prueba de vacío

$$IL, av = (Ia + Ib + Ic) / 3 \quad 1,40 \text{ (Amps)}$$

$$V, In = Vt / 1.7320 \quad 120 \text{ (V)}$$

Por tanto:

$$|ZIn| = V, In / IL, av \quad 85,78 \text{ (ohmios)} = X1 + Xm$$

Con los datos encontrados podemos determinar las pérdidas del cobre en el estator:

$$Psc1 = 3 * IL, av * IL, av * R1 \quad 36,54 \text{ (Wattios)}$$

Por consiguiente las pérdidas rotacionales en vacío son:

$$Prot = Pin, In - Psc1 \quad 38,46 \text{ (Wattios)}$$

De la prueba de rotor bloqueado

$$I_L, av = (I_a + I_b + I_c) / 3 \quad 1,40 \text{ (Amps)}$$

La impedancia del rotor bloqueado es

$$|Z_{lr}| = V_t / (I_L, av * 1.7320) \quad 29,57 \text{ (Ohmios)}$$

Y el ángulo de la impedancia es:

$$\theta = \text{inv cos} (P_{in} / 1.7320 * V_t * I_L, av) \quad 66,61 \text{ (Grados)}$$

Entonces:

$$R_{lr} = |Z_{lr}| \cos \theta \quad 11,735 \text{ (Ohmios)} = R_1 + R_2$$

Como ya conocemos R1 tenemos: 6,214

$$R_2 = R_{lr} - R_1 \quad 5,521 \text{ (Ohmios)}$$

Tenemos que la reactancia a la frecuencia de prueba es igual a:

$$X'_{lr} = |Z_{lr}| \sin \theta \quad 27,136 \text{ (Ohmios)}$$

La reactancia equivalente a frecuencia nominal es :

$$X_{lr} = (f_{nominal} / f_{prueba}) * X'_{lr} \quad 27,136 \text{ (Ohmios)}$$

Por medio del dato de clase del motor podemos obtener por separado X1 y X2

$$X_1 \quad 13,57 \text{ (Ohmios)} \quad X_2 \quad 13,57 \text{ (Ohmios)}$$

Por lo tanto podemos obtener la reactancia del rotor:

$$X_m = |Z_{lr}| - X_1 \quad 72,21 \text{ (Ohmios)}$$

Con los datos antes obtenidos podemos realizar el circuito equivalente que se encuentra en la pestaña Circuito Eq.

Obtención del deslizamiento al par a plena carga y su valor de par

Primero debemos obtener los valores thevenin equivalentes:

$$V_{th} = V (X_m / (\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}) \quad 100,83 \text{ (V)}$$

$$R_{th} = R_1 (X_m / (X_1 + X_m))^2 \quad 4,404 \text{ (Ohmios)}$$

$$X_{th} = X_1 \quad 13,57 \text{ (Ohmios)}$$

El deslizamiento al cuál está dado el máximo par está dado por:

$$S_{max} = R_2 / (\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}) \quad 0,20 \quad 20,1\%$$

Este corresponde a la velocidad mecánica

$$N_m = (1 - s) N_{sinc} \quad 1.439 \text{ (RPM)}$$

El par máximo de este motor está dado por:

$$\tau = 3 V_{th}^2 / (2 \omega_{sinc} (R_{th} + (\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}))) \quad 2,66 \text{ (N.m)}$$

El torque de arranque se produce cuando $s = 1$ y es igual a:

$$\tau = 3 V_{th}^2 R_2 / (\omega_{sinc} ((R_{th} + R_2)^2 + (X_{th} + X_2)^2)) \quad 0,70 \text{ (N.m)}$$

Tabla que indica las señales, canales de acceso y pin de conexión en la tarjeta.

SEÑAL	Canal	Ping	Código de colores
Entrada			
ADJ Frecuenc	3	30	celeste
ADJ Voltaje	10	31	celeste
Voltaje Gener	2	65	negro
Voltaje Tacón	1	33	negro
Salida			
Control variad	0	22	blanco
Control gate	1	21	blanco
Fuentes			
5,3 Voltios DC		14	rojo
GND		55	verde

Tabla indicando los valores máximo y mínimos permitidos para definir estabilidad del sistema

		Frecuencia	Voltaje
Set Point		26	6
Rango (+/-)	2%	0,39	0,09
Valor Max Permitido		26,39	6,09
Valor Min Permitido		25,61	5,91

Nota: Los datos que están con amarillo pueden ser modificados y los cálculos de verdes se actualizan automáticamente

BIBLIOGRAFIA

1. FRINK, DONALD G., MWAYNE BEATY, Manual de Ingeniería eléctrica, Decimotercera Edición, Mc. Graw Hill.
2. DORF RICHARD C. & BISHOP ROBERT H, Modern Control Systems, Novena edición, Prentice Hall.
3. Simulink user guide, The MathWorks.
4. Power System Blockset for use with Simulink; The MathWorks.
5. The Real-Time Workshop for use with Simulink; The MathWorks.
6. xPC Target for use with Real-Time Workshop; The MathWorks.
7. System Identifications user guide; The MathWorks.
8. SMITH CORRIIO, Control automático de procesos, teoría y práctica, Editorial Limaza.
9. OGATA, PRENTICE HALL, Ingeniería de control moderna.

10. MITCHELL CARR D., Pid Control And Controller Tuning Techniques, Version 1, Abril 23-1986. lorien.ncl.ac.uk/ming/pid/PID.pdf.
11. CHAPMAN STEPHEN J., Máquinas Eléctricas. Tercera Edición, Mc. Graw Hill.
12. Low-Cost E Series Multifunction DAQ 12 or 16-Bit, 200 kS/s, 16 Analog Inputs, www.ni.com/pdf/products/us/4daqsc202-04_ETC_212-213.pdf.
13. MANUAL BASICO DE MATLAB, www.mat.ucm.es/deptos/maq/docencia/calcnium/matlab.pdf.
14. System Identification Toolbox, www-ccs.ucsd.edu/matlab/pdf_doc/ident/ident.pdf.
15. xPC Target, www.mtsac.edu/~gwkamin/Matlab_5-3-1_Pro/help/pdf_doc/xpc/xpc_target_ug.pdf
16. xPC Target, Modeling, Simulation, Implementation; The mathwork, www.mathworks.ch/support/product/XP/productnews/xpc_target_gs_2001_July_02.pdf