

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación



“CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE FRECUENCIA-VOLTAJE PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A ESCALA PARA EL LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO”

INFORME DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN POTENCIA

Presentado por

JIMMY JOEL ANCHUNDIA VELOZ

Guayaquil – Ecuador

2013

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Jehová Dios, por la vida y por darme la fuerza necesaria para culminar este proyecto, Filipenses 4:13.

Este logro académico se lo debo a mis padres Jimmy y Bolivia, a quienes agradezco por la ayuda que me brindaron de manera incondicional para cumplir con esta meta.

Al ing Juan del Pozo por la confianza que me ha brindado, por la paciencia que ha ejercido durante la ejecución del proyecto y por enseñarme que todas las metas son posibles si somos perseverantes.

A mis hermanas, familiares y amigos que colaboraron en la realización de este proyecto.

## **DEDICATORIA**

A mis padres Jimmy y Bolivia, por el amor y la gran paciencia que han ejercido durante el logro de este título profesional.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

PHD. BORIS VINTIMILLA B.

SUB-DECANO DE LA FIEC

---

MSc. JUAN DEL POZO L.

DIRECTOR DE PROYECTO

---

ING. ALBERTO HANZE

VOCAL PRINCIPAL

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de este informe de proyecto de grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)

---

JIMMY JOEL ANHUNDIA VELOZ

## RESUMEN

Este trabajo está conformado por dos partes, la primera parte es la construcción un banco de prueba para el LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO de la FIEC de un sistema de generación de energía eléctrica a escala, describiendo su diseño y construcción, donde se indican los elementos utilizados, la representación de cada uno de ellos al compararlos con los elementos de una central de generación eléctrica, los elementos utilizados para el control del sistema, los elementos utilizados para la protección de los equipos y para la seguridad de los usuarios.

La segunda parte es el control del sistema, que inicia con la obtención del MODELO MATEMÁTICO del sistema, para posteriormente simularlo y analizar la dinámica del sistema. Luego se identifica el sistema, obteniendo las funciones de transferencia por medio de pruebas realizadas alrededor de un punto de operación seleccionado. Por tratarse de un sistema tipo cero se implementa como estrategia de control, el control por VARIABLE DE ESTADOS por medio del MODELO INTERNO, que garantiza un error de estado estacionario igual a cero, cuando se realizan cambios de referencia tipo escalón y también cuando el sistema es perturbado. Por ser un sistema MIMO con dos variables de entrada y dos de salida, existe un acoplamiento entre sus variables, por tal motivo previo a controlar el sistema se DESACOPLA, obteniendo dos sistemas SISO. Al implementar la estrategia de control se presenta la necesidad de estimar las variables de estado del

sistema, para esto se diseñan OBSERVADORES de estado. Por último se diseña el controlador en base a especificaciones de funcionamiento como: tiempo de estabilización y sobrenivel porcentual. Para implementar el controlador primero se simula el sistema controlado, con el objetivo de comprobar su dinámica, para luego probarlo en el banco de prueba.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ÍNDICE GENERAL

ABREVIATURAS

SIMBOLOGÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

INTRODUCCIÓN

1 ANTECEDENTES.....	1
1.1 IDENTIFICACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA .....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN .....	3
1.3 OBJETIVOS .....	4
2 MARCO TEÓRICO .....	6
3 ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.....	11
3.1 DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBA DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.....	11

3.2 DISEÑO DE LA PARTE ELÉCTRICA DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.....	11
3.2.1DIAGRAMA DE CONTROL DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.	12
3.2.2DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL MOTOR.....	14
3.2.3 DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL ALTERNADOR .....	16
3.3 MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE .....	18
3.3.1ECUACIONES DESCRIPTIVAS DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.....	18
3.3.2ECUACIONES DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN EL DOMINIO DEL TIEMPO .....	20
3.3.3DIAGRAMA FUNCIONAL DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE ...	33
3.3.4ECUACIONES DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN EL DOMINIO DEL PLANO COMPLEJO s.....	34
3.3.5DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.	40
3.4 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN VARIABLES DE ESTADO POR MEDIO DEL MODELO MATEMÁTICO.....	41
3.5 SIMULACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN MATLAB SIMULINK.....	44

3.5.1 SIMULACIÓN DEL SISTEMA VARIANDO EL VOLTAJE DE CAMPO DEL MOTOR $v_f(t)$ MANTENIENDO CONSTANTE EL VOLTAJE DE CAMPO DEL ALTERNADOR $v_{fg}(t)$ Y LA CARGA $R_L(t)$ .....	45
3.5.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA VARIANDO EL VOLTAJE DE CAMPO DEL ALTERNADOR $v_{fg}(t)$ MANTENIENDO CONSTANTE EL VOLTAJE DE CAMPO DEL MOTOR $v_f(t)$ Y LA CARGA $R_L(t)$ .....	47
3.5.3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA VARIANDO LA CARGA $R_L(t)$ MANTENIENDO CONSTANTE EL VOLTAJE DE CAMPO DEL ALTERNADOR $v_{fg}(t)$ Y EL VOLTAJE DE CAMPO DEL MOTOR $v_f(t)$ ....	49
4 IMPLEMENTACIÓN.....	54
4.1 CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBA .....	54
4.2 CONSTRUCCIÓN DE LA PARTE ELÉCTRICA DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE .....	535
4.3 CONSTRUCCIÓN DE LA PARTE MECÁNICA DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE .....	56
4.4 AJUSTE DE LOS PARAMETROS DEL VARIADOR DE FRECUENCIA	58
4.5 AJUSTE DE LAS CONEXIONES DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO.....	59

4.6 AJUSTE DE LAS CONEXIONES DEL ENCODER. ....	60
4.7 CONEXIONES EN EL cFP. ....	62
5 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	66
5.1 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN MATLAB SIMULINK. ....	66
5.2 ELECCIÓN DEL PUNTO DE OPERACIÓN .....	66
5.3 IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK DEL MODELO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE. ....	68
5.3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE. .....	74
5.3.2 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA FRECUENCIA- VOLTAJE. ....	76
5.4 REPRESENTACIÓN DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA IDENTIFICADAS EN DIAGRAMA DE FLUJO DE SEÑAL. ....	82
5.4.1 REPRESENTACIÓN EN VARIABLES DE FASE DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA VELOCIDAD $\omega$ VS VOLTAJE DEL VARIADOR DE FRECUENCIA $V_f$ . ....	85

5.4.2 REPRESENTACIÓN EN VARIABLES DE FASE DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA VELOCIDAD $\omega$ VS VOLTAJE DE CAMPO DEL ALTERNADOR $V_{fg}$ .....	87
5.4.3 REPRESENTACIÓN EN VARIABLES DE FASE DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA VOLTAJE DE SALIDA $V_a$ VS VOLTAJE VARIADOR DE FRECUENCIA $V_f$ .....	88
5.4.4 REPRESENTACIÓN EN VARIABLES DE FASE DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA VOLTAJE DE SALIDA $V_a$ VS VOLTAJE DE CAMPO DEL ALTERNADOR $V_{fg}$ .....	90
5.5 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN VARIABLES DE ESTADO. ....	92
5.6 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES DEL ESTADO.....	99
5.7 ESPECIFICACIONES GENERALES DE FUNCIONAMIENTO .....	100
5.8 CONTROLADOR POR EL MÉTODO DE REUBICACIÓN DE POLOS DEL MODELO INTERNO. ....	101
5.9 DESACOPLAMIENTO DEL SISTEMA FRECUENCIA –VOLTAJE .....	106
5.9.1 CÁLCULO DEL DESACOPLADOR .....	107

5.10	DISEÑO DEL CONTROLADOR .....	114
5.10.1	DETERMINACIÓN DE LA OBSERVABILIDAD DEL SISTEMA. ....	115
5.10.2	DETERMINACIÓN DE LA CONTROLABILIDAD DEL SISTEMA.....	118
5.10.3	DESARROLLO DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR .....	120
5.10.4	DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA EL SISTEMA FRECUENCIA. .....	122
5.10.5	DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA EL SISTEMA VOLTAJE DE SALIDA.....	126
5.11	DISEÑO DEL OBSERVADOR.....	129
5.11.1	CÁLCULO DEL OBSERVADOR PARA ESTIMAR LOS ESTADOS.	134
5.11.2	CÁLCULO DEL OBSERVADOR PARA EL SISTEMA FRECUENCIA .....	134
5.11.3	CÁLCULO DEL OBSERVADOR PARA EL SISTEMA VOLTAJE DE SALIDA .....	137
5.12	SIMULACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE UTILIZANDO EL MODELO INTERNO. ....	141
5.13	PRUEBA Y AJUSTE FINO DEL CONTROLADOR EN EL BANCO DE PRUEBA.....	147

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

ANEXO A. VISTAS DEL DISEÑO DE LA PLANTA

ANEXO B. CONFIGURACIÓN DE LOS PARAMETROS EN LA SIMULACIÓN, EN LA PLANTA REAL, DE LOS BLOQUES OPC.

ANEXO C. ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LOS EQUIPOS.

ANEXO D. CÓDIGO DEL DRIVER DEL MOTOR DE PASO.

ANEXO E. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.

ANEXO F. PRÁCTICA DE LABORATORIO.

BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

A	Amperio
cFP	Equipo de Campo – Compact Field Point
FIEC	Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
H	Henrio
Hz	Herzt
Hp	Horsepower
m	Metro
MIMO	Múltiple entrada múltiple salida
N	Newton
OPC	Open process Control – Control Abierto de Procesos
rad	Radianes
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundo
V	Voltio

$\Omega$

Ohm

Wb

Weber

## SIMBOLOGÍA

$A$	Matriz de estados
$A_{mi}$	Matriz de estados de modelo interno
$b$	Coefficiente de fricción
$B$	Matriz de entradas
$B_{mi}$	Matriz de entrada del modelo interno
$C$	Matriz de salida
$C_{mi}$	Matriz de salida del modelo interno
$e_a$	Voltaje electromotriz
$f$	Frecuencia
$I_f$	Corriente de campo
$J$	Momento de inercia
$K$	Constante de proporcionalidad
$L$	Inductancia
$P_o$	Matriz de observabilidad
$P_c$	Matriz de controlabilidad
$r$	Señal de prueba
$R$	Resistencia

$R_L$	Perturbación de la carga
$T_m$	Torque motor
$T_d$	Torque de perturbación
$u_r$	Vector de perturbación
$u_p$	Vector de entrada
$V_a$	Voltaje generado
$V_f$	Voltaje de campo
$x$	Vector de estados
$y$	Vector de salida
$\tau$	Constante de tiempo
$\varphi$	Flujo magnético
$\omega$	Velocidad

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Diagrama de control del sistema frecuencia-voltaje .....	13
Figura 3.2 Diagrama de fuerza del motor trifásico .....	15
Figura 3.3 Diagrama de conexiones del alternador .....	17
Figura 3.4 Circuito equivalente del motor de corriente continua .....	20
Figura 3.5 Diagrama funcional del motor DC controlado por campo .....	26
Figura 3.6 Circuito equivalente del generador de corriente continua .....	28
Figura 3.7 Diagrama funcional del generador de corriente continua.....	33
Figura 3.8 Diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje .....	34
Figura 3.9 Diagrama de bloques del motor DC.....	37
Figura 3.10 Diagrama de bloques del generador DC.....	39
Figura 3.11 Diagrama de bloques del sistema frecuencia-voltaje.....	40
Figura 3.12 Diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje en Simulink	44
Figura 3.13 Diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje cuando se produce una variación en el voltaje de campo del motor manteniendo constante el voltaje de campo del alternador y la variación de la carga. ....	46

Figura 3.14 Frecuencia y voltaje generados al variar el voltaje de campo del motor.....	46
Figura 3.15 Diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje cuando se produce una variación en el voltaje de campo del alternador manteniendo constante el voltaje de campo del motor y la variación de la carga .....	47
Figura 3.16 Frecuencia y voltajes generados al variar el voltaje de campo del alternador.....	48
Figura 3.17 Diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje cuando se produce una variación en la carga manteniendo constante el voltaje de campo del motor y el voltaje de campo del alternador.....	49
Figura 3.18 Frecuencia y voltajes generados al realizar variación en la carga. ....	50
Figura 5.1 Prueba de circuito abierto del alternador .....	67
Figura 5.2 Modelo en SIMULINK para la adquisición de datos.....	69
Figura 5.3 Subsistemas señal motor y señal alternador .....	70
Figura 5.4 Subsistema arranque.....	71
Figura 5.5 Subsistema planta .....	72
Figura 5.6 Subsistema convertidor_Pulso_Velocidad.....	73

Figura 5.7 a) subsistema señal alternador y señal motor, b) Configuración del diagrama de bloque para la adquisición de datos parte 1 .....	75
Figura 5.8 a) subsistema señal alternador y señal motor, b) Configuración del diagrama de bloque para la adquisición de datos parte 2.....	76
Figura 5.9 Respuesta de la velocidad y del voltaje debido a perturbación ...	81
Figura 5.10 Función de transferencia de cuarto orden expresado en variables de fase. ....	84
Figura 5.11 Representación de la ecuación 5.11 en variables de fase .....	86
Figura 5.12 Representación de la ecuación 5.14 en variables de fase .....	87
Figura 5.13 Representación de la ecuación 5.17 en variables de fase .....	89
Figura 5.14 Representación de la ecuación 5.20 en variables de fase .....	91
Figura 5.15 Representación del sistema frecuencia-voltaje en función de transferencia .....	93
Figura 5.16 Representación del sistema frecuencia-voltaje en diagrama de flujo .....	94
Figura 5.17 Simulación del sistema frecuencia-voltaje a) variable de estado b) función de transferencia .....	98

Figura 5.18 Respuestas de las simulaciones a) variable de estados b) función de transferencia .....	99
Figura 5.19 Diagrama del modelo interno .....	101
Figura 5.20 Ecuación diferencial de estados .....	102
Figura 5.21 Ecuación de salida.....	102
Figura 5.22 Representación del sistema frecuencia-voltaje en diagrama de bloques. ....	107
Figura 5.23 Diagrama de bloques del desacoplador.....	110
Figura 5.24 Simulación del sistema frecuencia-voltaje desacoplado.....	112
Figura 5.25 Gráficas del sistema desacoplado .....	113
Figura 5.26 Ubicación de polo complejos conjugados en el plano complejo $s$ para un sistema de segundo orden.....	121
Figura 5.27 Concepto del observador .....	129
Figura 5.28 Esquema del sistema con observador .....	133
Figura 5.29 Observador del sistema frecuencia.....	136
Figura 5.30 Comparación entre los estados $x(t)$ y $x_e(t)$ .....	137
Figura 5.31 Observador del sistema voltaje de salida .....	140

Figura 5.32 Comparación entre los estados $x(t)$ y $x_e(t)$ .....	140
Figura 5.33 Modelo de Simulink del sistema frecuencia-voltaje con controlador de modelo interno. ....	141
Figura 5.34 Modelo de Simulink del sistema frecuencia-voltaje, subsistema observador.....	142
Figura 5.35 Modelo de Simulink del sistema frecuencia-voltaje, subsistema Desacoplador.....	143
Figura 5.36 Modelo de Simulink del sistema frecuencia-voltaje, subsistema Planta.....	144
Figura 5.37 Simulación del sistema frecuencia-voltaje utilizando modelo interno.....	145
Figura 5.38 Respuesta del sistema frecuencia-voltaje sometido a una perturbación.....	146
Figura 5.39 Modelo de Simulink del sistema frecuencia-voltaje con controlador de modelo interno para la planta real.....	147
Figura 5.40 Subsistema observador de la planta real.....	148
Figura 5.41 Subsistema Desacoplador de la planta real.....	149
Figura 5.42 Subsistema Planta.....	150

Figura 5.43 Respuesta al escalón del sistema frecuencia .....	152
Figura 5.44 Respuesta al escalón del sistema voltaje de salida .....	153
Figura 5.45 Carga del sistema vs voltaje motor de paso .....	154
Figura 5.46 Prueba del sistema perturbado .....	155

## INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Ajuste de los parámetros del variador de frecuencia .....	59
Tabla 4.2 Asignación de terminales del encoder incremental .....	61
Tabla 4.3 Conexiones en el cFP .....	64
Tabla 5.1 Ajustes en la matriz de realimentación de estados .....	151

## INTRODUCCIÓN

En las centrales de generación eléctrica de vital importancia realizar dos tipos de control. El primero es el control automático de generación AVC, que consiste en realizar el control carga frecuencia LFC, que mantiene la frecuencia del sistema en los valores programados, y el despacho económico. El segundo es el control AVR conocido como control regulador de voltaje, con la finalidad de mantener la magnitud del voltaje del sistema a un nivel específico. En lo mencionado anteriormente se puede visualizar la importancia que tienen ambos tipos de control en los sistemas de potencia.

El presente proyecto de graduación, propone construir un banco de prueba que representa una central de generación eléctrica a escala, donde se puede aplicar técnicas de control automático para realizar el control LFC y AVR. Además por tratarse de un sistema MIMO con dos variables de entrada y dos variables salidas, este proyecto provee al LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO DE LA FIEC, de un sistema donde se puede analizar la problemática del control multivariable.

Para realizar el control LFC y AVR del sistema, se implementa como técnica de control, el control por variables de estados, por el método de reubicación de polos del modelo interno. Además se utiliza otras técnicas de control, como el desacoplamiento de las variables de interés y el desarrollo de observadores para estimar los estados del sistema que no son medibles.

# CAPÍTULO 1

## 1 ANTECEDENTES

En el año 2005 se realizó el trabajo de graduación “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE FRECUENCIA Y VOLTAJE UTILIZANDO MATLAB” que constó de tres partes, la primera parte tiene que ver con la construcción de un modelo de una central eléctrica a escala donde se analizó la temática del control de la frecuencia y del voltaje. La segunda parte tiene que ver con el control del sistema, que por tratarse de un sistema multivariable (MIMO) con dos variables de entrada y dos variables de salida, se realizaron pruebas aplicando técnicas de control para sistemas multivariable. La tercera parte del trabajo fue la realización de manuales de experimentación para la realización de prácticas en el LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO.

El modelo de la central eléctrica a escala del trabajo de graduación solo fue un prototipo, en el cual se obtuvieron resultados favorables con respecto al análisis del control de la frecuencia y del voltaje de las

centrales de generación eléctrica, pero por tratarse de un prototipo no pudo implementarse como algo duradero para las prácticas del laboratorio, por tal motivo se tiene una necesidad de poder contar con una planta robusta donde se pueda analizar esta problemática.

Este capítulo pretende analizar la necesidad que atraviesa el laboratorio de control automático de contar con un experimento donde se pueda analizar la temática del control de la frecuencia y del voltaje de las centrales eléctricas y al mismo tiempo la implementación de técnicas de control para sistemas multivariables. Además se establecen los objetivos del proyecto y su justificación.

## **1.1 IDENTIFICACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA**

La materia de CONTROL AUTOMÁTICO cuenta con su propio laboratorio experimental donde existen diferentes bancos de prueba para desarrollar diferentes experimentos, en la actualidad los bancos de pruebas existentes en el LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO solo analizan la problemática de los sistemas monovariante o SISO.

Por lo mencionado es necesario que el laboratorio de control automático pueda contar con un experimento que cubra la temática de los sistemas multivariable o MIMO y el diseño de controladores para el manejo de estos sistemas.

También se debe considerar que en las materias OPERACIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA y CENTRALES ELÉCTRICAS, que son materias de formación profesional de la carrera INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN POTENCIA, se analiza en detalle el comportamiento de las centrales de generación eléctrica, por tal motivo es necesario poder contar con un experimento donde se analice la temática del comportamiento de las centrales de generación eléctrica.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN**

En el laboratorio de control automático se realizan prácticas con el objetivo de implementar los conocimientos adquiridos en la materia de CONTROL AUTOMÁTICO y en materias de la MAESTRÍA EN AUTOMATIZACIÓN de la FIEC (MACI).

Este banco de prueba va a permitir la realización de experimentos donde se podrá realizar la comprobación teórica de las estrategias de control aplicada a los sistemas multivariables.

También se debe considerar que en las centrales de generación eléctrica es de vital importancia realizar dos tipos de control. El primero es el control automático de generación AVC, que consiste en realizar el control carga frecuencia LFC, que mantiene la frecuencia del sistema en

los valores programados. El segundo es el control AVR conocido como control regulador de voltaje, con la finalidad de mantener la magnitud del voltaje del sistema a un nivel específico.

Como el control de la frecuencia y del voltaje es un caso real que se da en la operación de los sistemas de potencia, que es de gran importancia para el eficiente uso de la energía. Este proyecto propone modelar una central de generación eléctrica, donde se puede aplicar técnicas de control automático para realizar el control carga frecuencia LFC y el control regulador de voltaje AVR.

Debido a que los estudiantes de ingeniería eléctrica no contamos con un experimento donde se pueda aplicar los conocimientos de la operación de los sistemas de potencia, sería de gran importancia poder con un experimento de estas características.

### **1.3 OBJETIVOS**

- Rediseñar y construir el banco de prueba para el análisis de las estrategias de control de los sistemas multivariables.
- Realizar el control de la frecuencia y del voltaje usando como técnica de control, el control por variables de estado.

- Proporcionar manuales de experimentación, basados en establecer una pre-práctica y práctica para el uso del banco de prueba en el LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO.

## CAPÍTULO 2

### 2 MARCO TEÓRICO

El presente proyecto de graduación consiste en un rediseño del trabajo de graduación “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE FRECUENCIA Y VOLTAJE UTILIZANDO MATLAB”. [1]

Que consistió en la construcción de un prototipo que modela una central de generación eléctrica a escala donde:

La turbina.- que proporciona la fuerza motriz al sistema, está representada por el motor de inducción de 0.5 hp.

La válvula principal.- En el caso de una central hidroeléctrica controla el flujo de agua hacia la turbina para aumentar o disminuir su energía cinética. Ese es el papel que realiza el variador de frecuencia.

---

1 Diseño e implementación de un sistema de control de frecuencia y voltaje utilizando Matlab, trabajo de graduación, María Antonieta Álvarez, José Luis Gonzales, 2005.

El generador síncrono.- está representado por un alternador de automóvil de 12 polos, con salida de voltaje trifásica y DC. Acoplado con el motor de inducción con un sistema de poleas tipo V.

El excitador.- Representado por medio de una tarjeta electrónica, que amplifica el voltaje y la corriente de alimentación al campo del alternador.

La carga del sistema.- Representada por tres luces monofásicas conectadas en paralelo, sirviendo dos luces de carga inicial, y la tercera controlada por un contactor, representa la perturbación del sistema.

El sensor de velocidad.- Indispensable para determinar el gobernador de la turbina. Es sensada por un tacogenerador acoplado al motor de inducción con poleas tipo V.

La siguiente parte del proyecto consistió en el control del sistema. Para el control del sistema se empezó con el MODELO MATEMÁTICO del sistema, para obtener las ecuaciones que describen su dinámica, luego se realizó la IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA con la herramienta IDENT de Matlab, que proporciona de forma experimental las funciones de transferencia del sistema. Por último, por tratarse de un sistema con dos variables de entrada y dos de salida con acoplamiento entre sus variables de entrada y salida se utilizó la técnica DESACOPLADOR, que es una técnica de control para sistema multivariable (MIMO), que permite que estos tipos de sistema se conviertan en varios sistemas monovariable

(SISO), de tal forma que se los controló por medio de un control proporcional integral derivativo PID, determinando los controladores por medio de la herramienta SISOTOOL DE MATLAB.

El rediseño que se realiza en este proyecto de graduación consiste en construir un banco de prueba que representa una central de generación eléctrica donde se utilizan parte de los equipos existentes tales como el alternador y el motor trifásico de inducción que representa la turbina y al generador síncrono respectivamente. Y también reemplazar e incorporar nuevos equipos. Esperando construir un banco de prueba robusto.

Para la parte que consiste en el control del sistema, llamado por el nombre de sistema frecuencia voltaje, se elige como técnica de control, el control en VARIABLES DE ESTADO POR EL METODO DE REUBICACIÓN DE POLOS DEL MODELO INTERNO, que es una técnica de control aplicada a sistemas tipo cero, que permite que el error de estado estacionario sea cero ante cambios de referencia y de perturbación del sistema. Previamente al control se necesita obtener: EL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA, que se basa en determinar las expresiones matemáticas que describen la dinámica del sistema. LA IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA, que es realizada con la herramienta IDENT DE MATLAB, que permite construir de forma exacta modelos simplificados de sistemas complejos.

Al implementar el control por VARIABLES DE ESTADOS del sistema frecuencia voltaje se presenta la necesidad de utilizar técnicas de control como: La técnica DESACOPLADOR, que permite tratar al sistema multivariable de dos entradas y dos salidas, como dos sistemas monovariantes (SISO). Y la técnica OBSERVADORES, necesaria para estimar los estados del sistema.

Se espera que el control del sistema frecuencia voltaje funcione en base a los requerimientos establecidos previo al diseño del controlador.

## **CAPÍTULO 3**

### **3 ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE**

#### **3.1 DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBA DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.**

El diseño del banco de prueba del sistema frecuencia-voltaje es realizado pensando en construir un sistema robusto y en estandarizar los bancos de prueba del LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO. En el anexo A se puede visualizar las vistas frontal, lateral derecha, lateral izquierda y posterior del diseño del banco de prueba.

El diseño del banco de prueba se puede visualizar que consta básicamente de tres partes.

La primera parte es el tablero de control, ubicado en la parte superior del banco de prueba, provisto de luces piloto, botoneras de paro y marcha. En la parte superior de la vista lateral derecha se pueden visualizar el

Interruptor principal que es un swithon-off, el selector de funcionamiento manual o automático, los potenciómetros de control, el terminal conector CB-68LPR y el extractor de aire.

La segunda parte es el área de trabajo provista de tomas de corriente, una base que sirve de mesa, una tapa atornillada que sirve para realizar las conexiones eléctricas en el terminal conector CB-68LPR y un cajón para guardar equipos de trabajo.

La tercera parte consiste en la mecánica del sistema provista de los acoples: motor-alternador, motor-encoder incremental y reóstato trifásico-motor de paso. Esta parte se encuentra ubicada en la parte inferior del banco de prueba, instalada por medio de una base metálica montada en las bases del banco de prueba.

### **3.2 DISEÑO DE LA PARTE ELÉCTRICA DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.**

La parte eléctrica del sistema frecuencia-voltaje consta de las conexiones del banco de prueba, donde se considera el diagrama de conexiones del motor, del alternador y el diagrama de control del sistema.

### 3.2.1 DIAGRAMA DE CONTROL DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.

El diagrama de control mostrado en la figura 3.1 consta de un relé C de 24 V DC, un contactor M de 220 V, pulsadores de marcha y paro, un selector para operar la planta en modo manual o automático y luces indicadoras que determinan el estado de la planta.

Al elegir el modo automático, todo el sistema es operado y controlado desde el computador por medio del cFP. [2] La interfaz gráfica que nos permite interactuar con la planta es el Simulink de Matlab.

El modo manual permite operar y controlar el sistema directamente desde la planta, el uso del computador solo es para visualizar las variables de interés.

---

2cFP (Compact Field Point) es un equipo producido por la Nacional Instruments que permite interactuar computadores con dispositivos eléctricos y/o electrónicos usados para control.

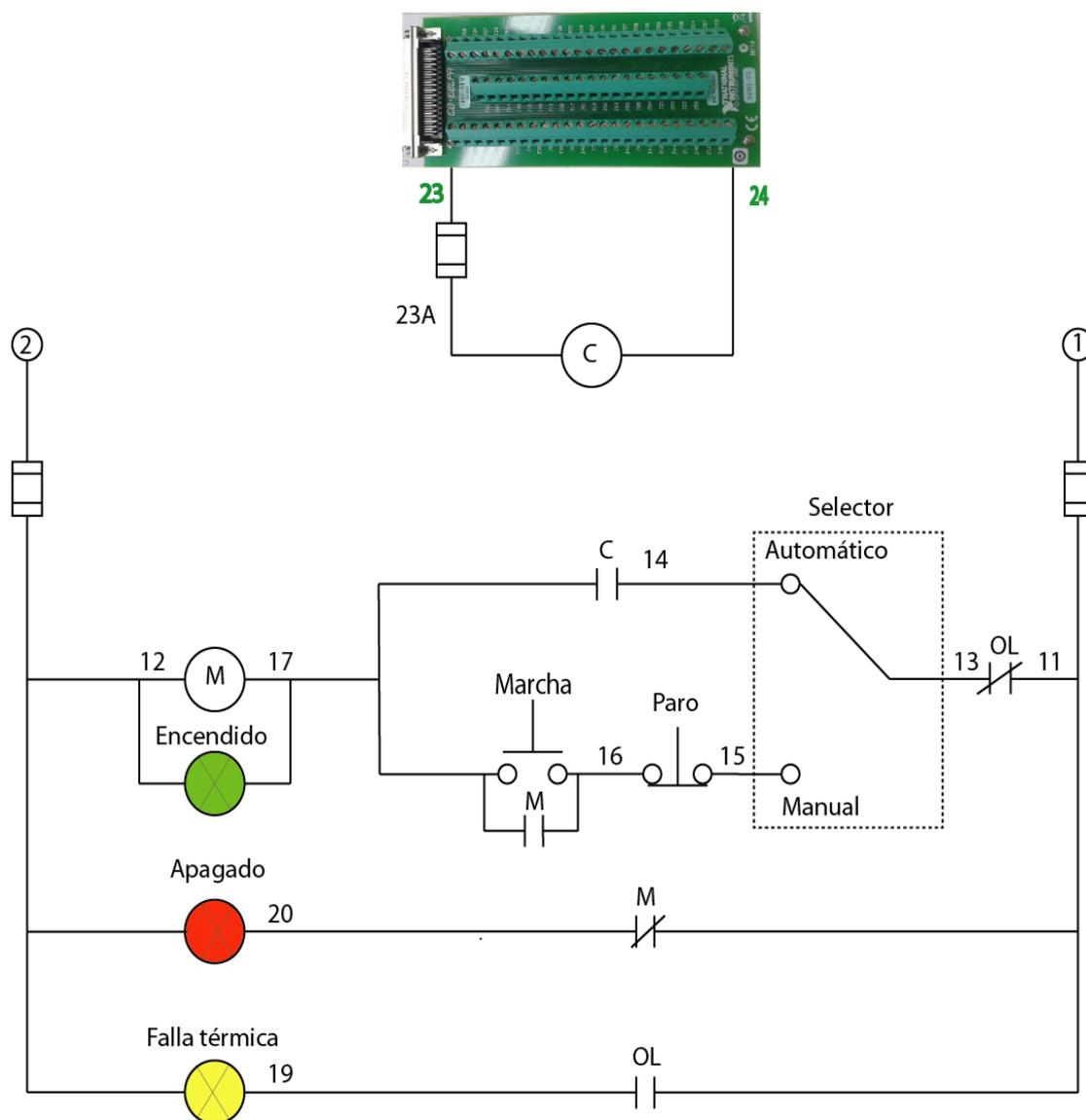


Figura 3.1 Diagrama de control del sistema frecuencia-voltaje

### 3.2.2 DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL MOTOR

El diagrama de fuerza del motor observado en la figura 3.2 consta de fusibles que protegen al equipo, un swithon-off principal para energizar o des-energizar completamente el equipo, los contactos normalmente abiertos M que son accionados por el diagrama decontrol, un variador de frecuencia monofásico a trifásico, la protección del motor, el motor de inducción trifásico y el encoder.

En la figura 3.2 también se puede observar las conexiones en los terminales del variador de frecuencia, de tal manera que puede ser controlado por el computador en forma automática o por el potenciómetro de velocidad (pot. Velocidad) en forma manual.

Los números de color negro y color verde de la figura 3.2 representan las marquillas de las conexiones en el sistema frecuencia-voltaje y las conexiones en los terminales del bloque conector CB-68LPR respectivamente.

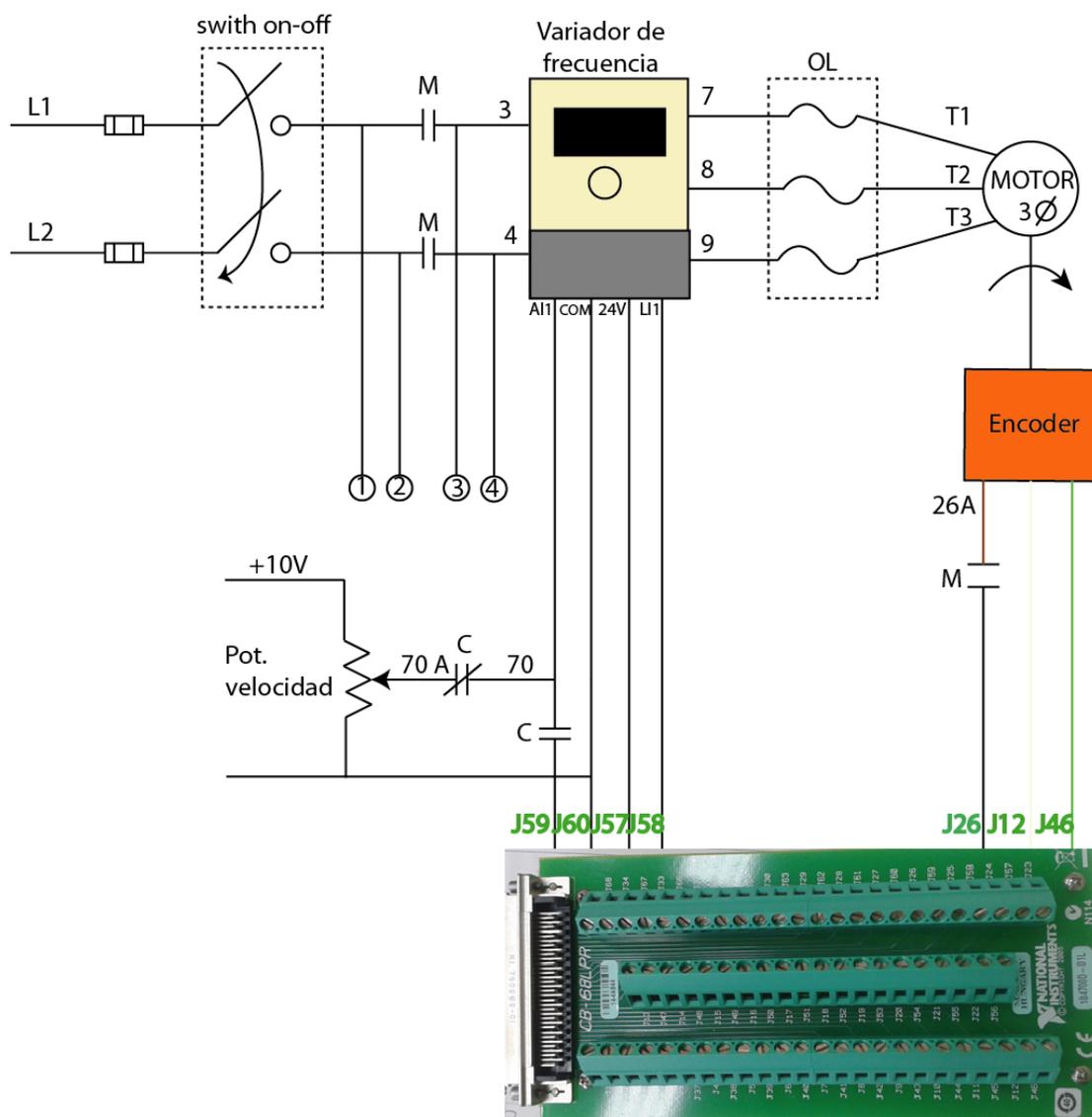


Figura 3.2 Diagrama de fuerza del motor trifásico

### 3.2.3 DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL ALTERNADOR

El diagrama de conexiones del alternador mostrado en la figura 3.3, consta del circuito equivalente del alternador compuesto del diagrama del inducido o estator y del campo o rotor, la representación de las cargas del sistema compuesto por las resistencias fijas y las resistencias variables del reóstato trifásico (VARIAC) conectadas en una configuración Y paralelo y la representación del motor de paso controlado por driver.

En el diagrama del alternador de la figura 3.3 se puede apreciar el puente rectificador de diodos con sus terminales de salidas de color azul y negro utilizados para sensor el voltaje generado con su respectiva protección, la alimentación trifásica de la carga se muestra con terminales de color verde, también con su respectiva protección.

Los números de color negro y color verde de la figura 3.3 representan las marquillas de las conexiones en el sistema frecuencia-voltaje y las conexiones en los terminales del bloque conector CB-68LPR respectivamente.

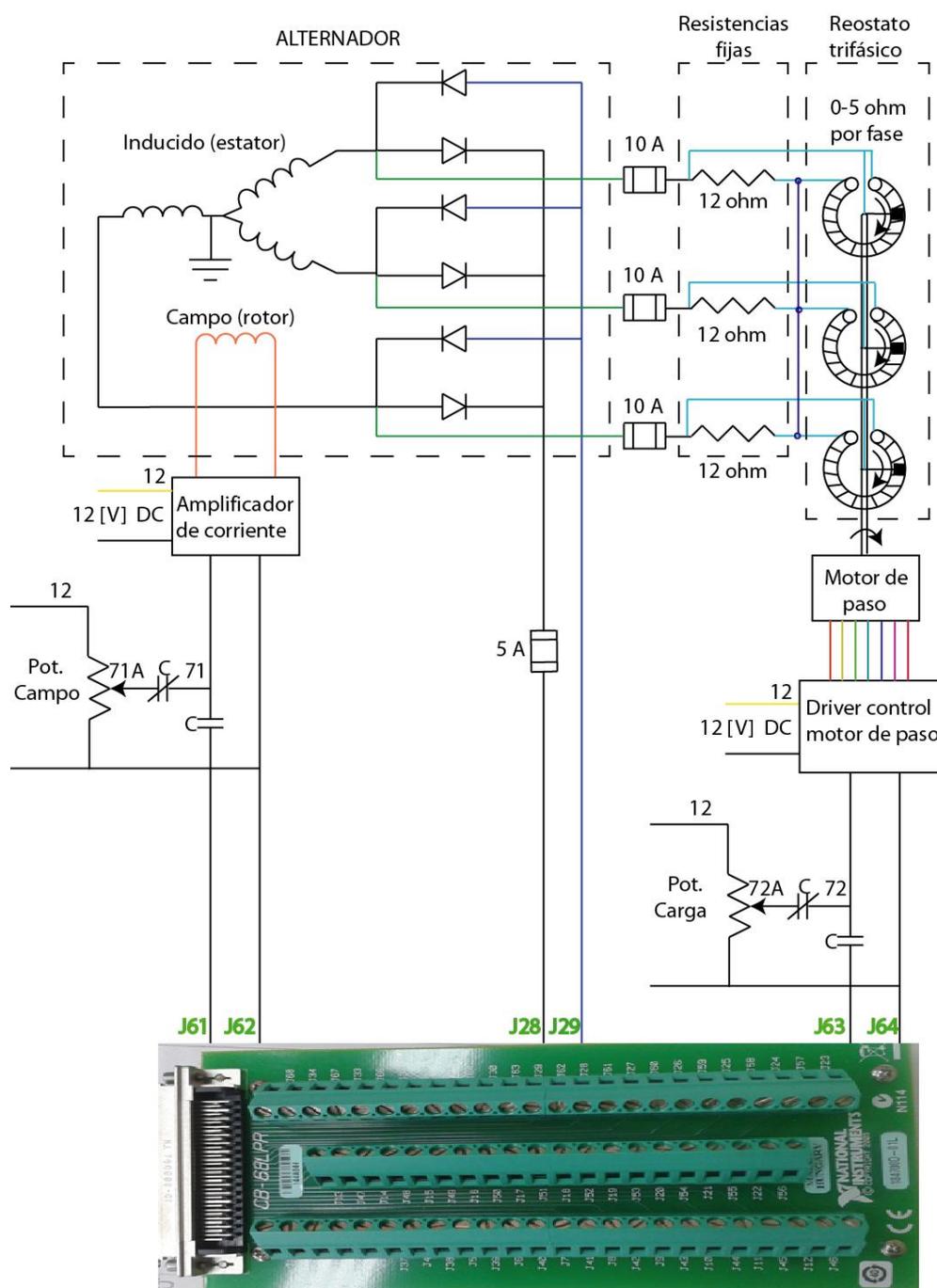


Figura 3.3 Diagrama de conexiones del alternador

El amplificador de corriente de la figura 3.3 controla el voltaje de salida al amplificador manteniéndolo igual al de la entrada, es decir el circuito amplificador es un seguidor de voltaje y su entrada está conectada de tal manera que pueda ser controlado de forma manual por el potenciómetro campo o de forma automática por el computador. Su diagrama esquemático se muestra en el anexo C.

El driver para controlar el motor de paso puede ser controlado en forma manual por el potenciómetro carga o en forma automática por el computador, su diagrama esquemático se muestra en el anexo C y el código o programación del driver se muestra en el anexo D.

### **3.3 MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE**

#### **3.3.1 ECUACIONES DESCRIPTIVAS DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE**

El sistema frecuencia-voltaje puede representar cualquier tipo de central de generación eléctrica, esta puede ser de tipo hidroeléctrica, térmica, nuclear, o eólica.

Anteriormente se mencionó que el motor de inducción representa la turbina, el alternador representa al generador síncrono, las resistencias de  $12 \Omega$  conectadas en paralelo con el reóstato

trifásico(VARIAC) de resistencia de  $0-5 \Omega$  representa la carga variable del sistema.

En este capítulo se desea modelar matemáticamente el sistema frecuencia-voltaje, por lo tanto se necesita modelar cada uno de los elementos del sistema.

El motor de inducción que representa la turbina está controlado por medio de un variador de frecuencia, esto nos ayuda a simplificar la representación del motor de inducción debido a que se comporta aproximadamente como un motor DC controlado por campo, por otro lado el alternador en si es un generador sincrónico, donde el campo del generador está representado por el rotor y su armadura por el estator, sucede lo contrario con el generador DC donde la representación de campo y armadura esta invertida en comparación con el generador sincrónico, despreciando esta diferencia el modelo matemático de un motor sincrónico y un motor DC es idéntico, por tal motivo al generador sincrónico del sistema frecuencia-voltaje se lo va a modelar como si este fuera un generador DC.

### 3.3.2 ECUACIONES DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Para obtener las ecuaciones que describen la dinámica del sistema frecuencia-voltaje, se inicia analizando los circuitos equivalentes de cada uno de los elementos del sistema, primero se va a analizar el circuito equivalente del motor DC controlado por campo y luego el del alternador, una vez obtenidas las ecuaciones, estas pueden ser representadas gráficamente en diagramas funcionales.

En la figura 3.4 se muestra el circuito equivalente del motor de corriente continua controlado por campo, en el cual se especifica el circuito del campo y de armadura o inducido.

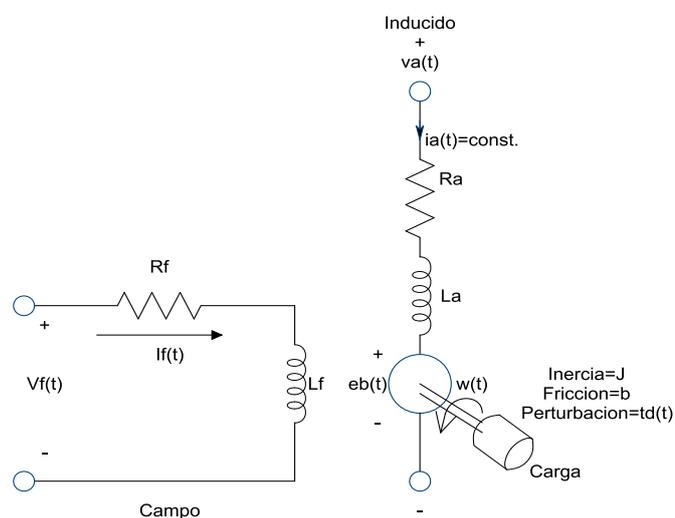


Figura 3.4 Circuito equivalente del motor de corriente continua

En el circuito del campo de la figura 3.4 se deduce que el voltaje de campo, en el motor DC controlado por campo está dado por:

$$v_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt};$$

Ecuación 3.1 Voltaje de campo en función de la corriente de campo

$v_f(t)$  Es el voltaje de campo en voltios [V]

$i_f(t)$  Es la corriente de campo en amperios [A]

$R_f$  Es la resistencia del campo en ohmio [ $\Omega$ ]

$L_f$  Es la inductancia del campo en henrio [H]

$\frac{di_f(t)}{dt}$  Es la primera derivada de la corriente de campo con respecto al tiempo.

Se conoce que el torque del motor DC controlado por campo es proporcional a la corriente de campo por lo tanto:

$$T_m(t) = K_f i_f(t)$$

Ecuación 3.2 Torque en función de la corriente de campo

$T_m(t)$  Es el torque motor en newton por metro [Nxm]

$i_f(t)$  Es la corriente de campo en amperios [A]

$K_f$  Es la constante de proporcionalidad

Reemplazandola ecuación 3.2 en la ecuación 3.1 se obtiene:

$$v_f(t) = R_f K_f T_m(t) + L_f K_f \frac{dT_m}{dt} ;$$

$$\frac{L_f}{R_f} \frac{dT_m}{dt} + T_m(t) = \frac{K_f}{R_f} v_f(t);$$

$$\tau_f \frac{dT_m}{dt} + T_m(t) = K v_f(t)$$

Ecuación 3.3 Relación voltaje de campo con el torque

Dónde:

$\tau_f$  Es la constante de tiempo eléctrica del motor

$T_m(t)$  Es el torque motor en newton por metro [Nxm]

$v_f(t)$  Es el voltaje de campo en voltio [V]

También es conocido que el torque motor es igual a la suma del torque de la carga más el torque de perturbación o de disturbio entonces:

$$T_m(t) - T_d(t) = T_L(t)$$

Ecuación 3.4 Torque de carga en función del torque de perturbación y del torque motor.

Dónde:

$T_L(t)$  Es el torque de carga en newton por metro [Nxm]

$T_m(t)$  Es el torque motor en newton por metro [Nxm]

$T_d(t)$  Es el torque de perturbación en newton por metro [Nxm]

El torque de perturbación no suele tomarse en cuenta, sin embargo a menudo debe considerarse en sistemas sujetos a fuerzas externas.

[3] Como en este caso el torque de perturbación es función de la variación de la carga entonces:

$$T_d = f(R_L)$$

Ecuación 3.5 Torque de perturbación en función de la variación de la carga

Al Linearizar la ecuación 3.5 tenemos:

$$T_d(t) = K_d R_L(t)$$

Ecuación 3.6 Torque de disturbio en función de la variación de carga linearizada.

Dónde:

$T_d(t)$  Es el torque de perturbación en newton por metro [Nxm]

$R_L$  Representa la variación de la carga en ohmio [ $\Omega$ ]

El torque de carga para una inercia de rotación se escribe como:

$$T_L(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + b\omega(t)$$

Ecuación 3.7 Torque de carga para una inercia de rotación

Reemplazando la ecuación 3.4 y la ecuación 3.6 en la ecuación 3.7

tenemos:

$$\frac{J}{b} \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{1}{b} (T_m(t) - K_d R_L(t));$$

$$\tau_L \frac{d\omega}{dt} + \omega(t) = K_L (T_m(t) - K_d R_L(t))$$

Ecuación 3.8 Ecuación del torque en función de la velocidad y de la variación de la carga

Dónde:

$\tau_L$  Es la constante de tiempo mecánica del motor

$\omega(t)$  Es la velocidad en radianes-segundo [rad/s]

$T_m(t)$  Es el torque motor en newton por metro [Nxm]

$R_L(t)$  Representa la variación de la carga en ohmios [ $\Omega$ ]

La frecuencia de la onda del voltaje generado por el alternador es proporcional a la velocidad angular entonces:

$$f(t) = K_1 \omega(t)$$

Ecuación 3.9 Frecuencia de la onda de voltaje generado en función de la velocidad angular

Dónde:

$f(t)$  Es la frecuencia generada del sistema en Hertz [Hz]

$\omega(t)$  Es la velocidad angular en radianes-segundo [rad/s]

Por medio de las ecuaciones obtenidas del circuito equivalente del motor DC controlado por campo, que representa la turbina del sistema frecuencia-voltaje, obtenemos el diagrama funcional como se muestra en la figura 3.5.

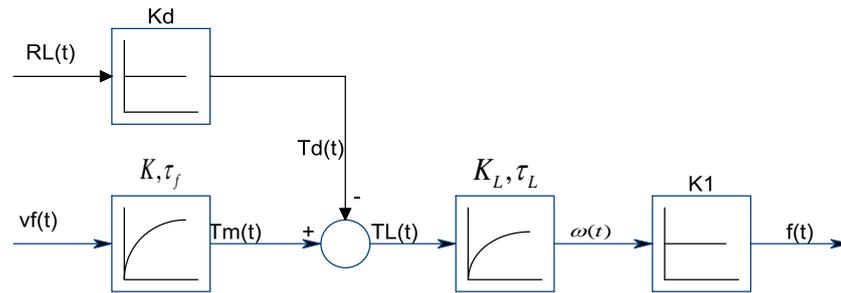


Figura 3.5 Diagrama funcional del motor DC controlado por campo

A continuación se van a analizar las ecuaciones que describen al generador de corriente continua, para realizarlo, se inicia con el circuito equivalente simplificado del generador síncrono mostrado en la figura 3.6 que en este caso representara una sola fase del sistema, asumiendo que el sistema es trifásico balanceado.

En la figura 3.6 se puede apreciar que el voltaje  $e_a$  es igual al voltaje  $v_a$  únicamente cuando no fluye corriente de armadura en la máquina.

Existen varios factores que ocasionan la diferencia entre  $e_a$  y  $v_a$  en un generador síncrono.

- La distorsión del campo magnético del entrehierro debido a la corriente que fluye en el estator, llamada reacción del inducido.
- La auto-inductancia de las bobinas del inducido (o armadura)

- Las resistencias de las bobinas del inducido.
- El efecto de la forma del rotor

El primer efecto mencionado, es la reacción del inducido. Cuando gira el rotor de un generador síncrono se induce un voltaje  $e_a$  en los devanados del estator. Si se añade una carga a los terminales del generador, la corriente fluye. Pero el flujo de corriente del estator produce su propio campo magnético en la máquina. Este campo magnético del estator distorsiona el campo magnético original del rotor y altera el voltaje de fase resultante. A este efecto se le llama reacción del inducido. La forma de modelar este efecto, es colocando una reactancia  $x$  en serie con el voltaje contra-electromotriz  $e_a$ . El segundo y tercer efecto tiene que ver con la autoinductancia, que genera una reactancia  $x_a$ , y la resistencia de las bobinas del estator o armadura, el cuarto efecto tiene que ver con la forma del rotor, el cual no se lo va a considerar en este análisis [4].

Como se puede observar en el circuito equivalente de la figura 3.6 el valor de  $x_s$ , que está conformado por la reacción del inducido y la autoinductancia de la bobina del estator, se lo desprecia, simplificando

---

4 Circuito equivalente de un generador síncrono; Stephen J. Chapman- Máquinas eléctricas-Mc Graw Hill-274p

el circuito equivalente del generador síncrono en el circuito equivalente de un generador de corriente continua. [5]

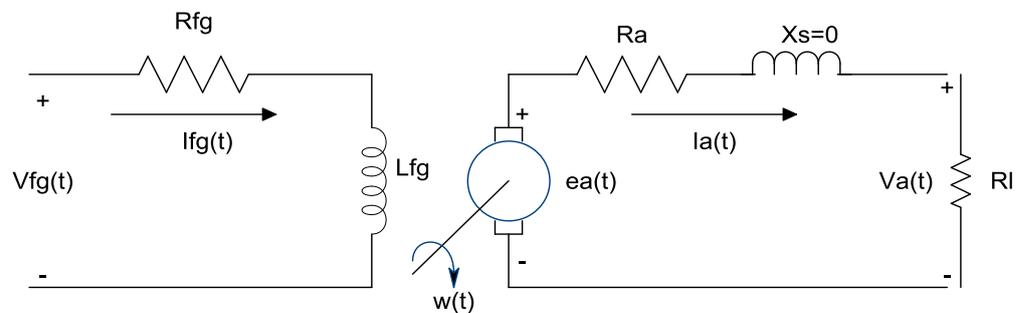


Figura 3.6 Circuito equivalente del generador de corriente continua

El voltaje contra-electromotriz de un generador síncrono es función del flujo generado por el campo  $\phi$  y de la velocidad a la cual gira el rotor del generador.

$$e_a(t) = f(\phi, \omega)$$

Ecuación 3.10 Voltaje electromotriz es función del flujo y de la velocidad

Dónde:

$e_a(t)$  Es el voltaje electromotriz en voltios [V]

$\phi(t)$  Es el flujo generado por el campo en weber [Wb]

$\omega(t)$  Es la velocidad a la que gira el generador en radianes-segundo [rad/s].

Hay que considerar que los sistemas físicos son lineales dentro de algún rango de las variables. Sin embargo, todos los sistemas acaban siendo no lineales si sus variables aumentan sin ningún límite. Para que un sistema sea considerado lineal tiene que satisfacer las propiedades de superposición y homogeneidad, puede que algún sistema no cumpla con alguna de las propiedades mencionadas anteriormente. Sin embargo, este sistema puede considerarse lineal respecto de un punto de operación  $x_0, y_0$  para cambios pequeños de  $\Delta x$  y  $\Delta y$ . Escogido el punto de operación se puede desarrollar una aproximación lineal (linearización), al desarrollar la serie de Taylor en el punto de operación [6].

Linearizando la ecuación 3.10 se tiene

$$e_a = K_\varphi \varphi(t) + K_\omega \omega(t)$$

Ecuación 3.11 Voltaje electromotriz en función del flujo y de la velocidad linearizada  
El flujo generado por el campo es proporcional a la corriente de campo.

$$\varphi(t) = K_{fg} i_{fg}(t)$$

Ecuación 3.12 Flujo en función de la corriente de campo

---

6 Aproximaciones lineales de sistemas físicos: Bishop, Robert; Dorf, Richard – Sistemas de Control Moderno – Pearson Prentice Hall – 43p

Dónde:

$\varphi(t)$  Es el flujo generado por el campo en Weber [Wb]

$i_{fg}(t)$  Es la corriente de campo del generador en amperios [A]

Remplazando la ecuación 3.12 en la ecuación 3.11 tenemos:

$$e_a(t) = K_{fg} K_\varphi i_{fg}(t) + K_\omega \omega(t)$$

$$e_a(t) = K_i i_{fg}(t) + K_\omega \omega(t)$$

Ecuación 3.13 Voltaje electromotriz en función de la corriente de campo y de la velocidad

Dónde:

$e_a(t)$  Es el voltaje electromotriz en voltios [V]

$i_{fg}(t)$  Es la corriente de campo del generador en amperios [A]

$\omega(t)$  Es la velocidad a la que gira el generador en radianes-segundo [rad/s]

Al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff en la parte del campo del circuito equivalente de la figura 3.6 se obtiene:

$$\frac{di_{fg}(t)}{dt} = -\frac{R_{fg}}{L_{fg}} i_{fg}(t) + \frac{1}{L_{fg}} v_{fg}(t)$$

$$\frac{L_{fg}}{R_{fg}} \frac{di_{fg}(t)}{dt} + i_{fg}(t) = \frac{1}{R_{fg}} v_{fg}(t)$$

$$\tau_{fg} \frac{di_{fg}}{dt} + i_{fg}(t) = K_{fg} v_{fg}(t)$$

Ecuación 3.14 Voltaje de campo en función de la corriente de campo

Dónde:

$v_{fg}(t)$  Es el voltaje de campo del generador en voltios [V]

$i_{fg}(t)$  Es la corriente de campo del generador en amperios [A]

$\tau_{fg}$  Es la constante de tiempo del generador

Debido a que el valor de  $x_s$  del circuito equivalente del alternador lo asumimos despreciable, tenemos que el voltaje generado es función del voltaje electromotriz y de la variación de la carga.

$$v_a = f(e_a, R_L); \quad x_s \approx 0$$

$$v_a(t) = \frac{R_L}{R_a + R_L} e_a(t)$$

Ecuación 3.15 Voltaje generado es función del voltaje electromotriz y la variación de la carga

Dónde:

$v_a(t)$  Es el voltaje generado en voltios [V]

$e_a(t)$  Es el voltaje electromotriz en voltios [V]

$R_L(t)$  Es la variación de la carga en ohmios [ $\Omega$ ]

Al linearizar la ecuación 3.15, se obtiene la ecuación 3.16.

$$v_a(t) = K_e e_a(t) + k_r R_L(t)$$

Ecuación 3.16 Ecuación del voltaje de salida linearizada

Dónde:

$$K_e = \left. \frac{dv_a}{de_a} \right|_{R_l=const} = \frac{R_l}{R_a + R_l}; K_R = \left. \frac{dv_a}{dR_l} \right|_{e_a=const} = \frac{R_a}{(R_a + R_l)^2}$$

Ecuación 3.17 Valores de las constantes  $K_e$  y  $K_R$

Una vez obtenidas las ecuaciones se puede representar gráficamente en el dominio del tiempo al generador sincrónico que representa al alternador del sistema frecuencia-voltaje.

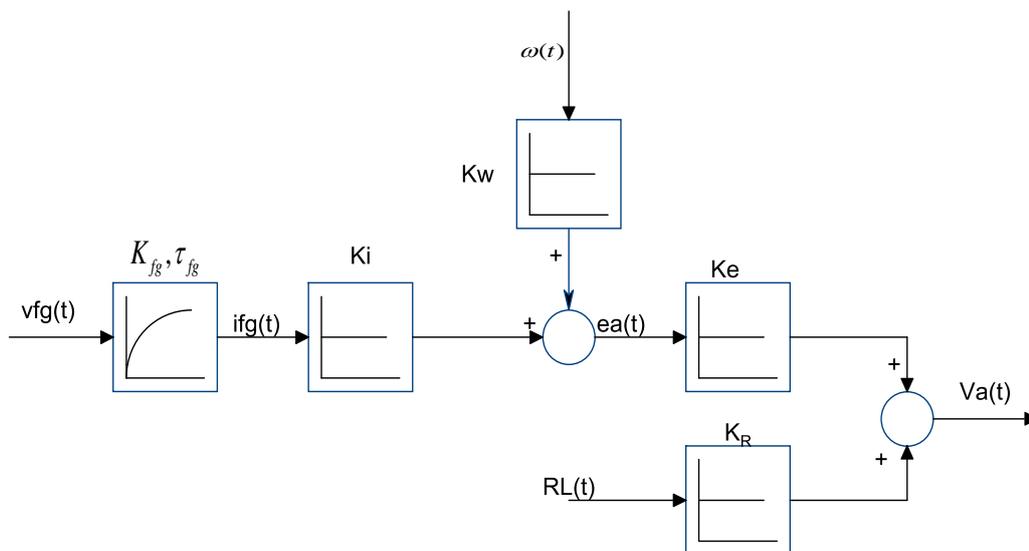


Figura 3.7 Diagrama funcional del generador de corriente continua

### 3.3.3 DIAGRAMA FUNCIONAL DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE

Al representar en un solo gráfico el diagrama funcional del motor de corriente continua controlado por campo que representa la turbina y el diagrama funcional del generador DC que representa al alternador, obtenemos el diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje como se muestra en la figura 3.8.

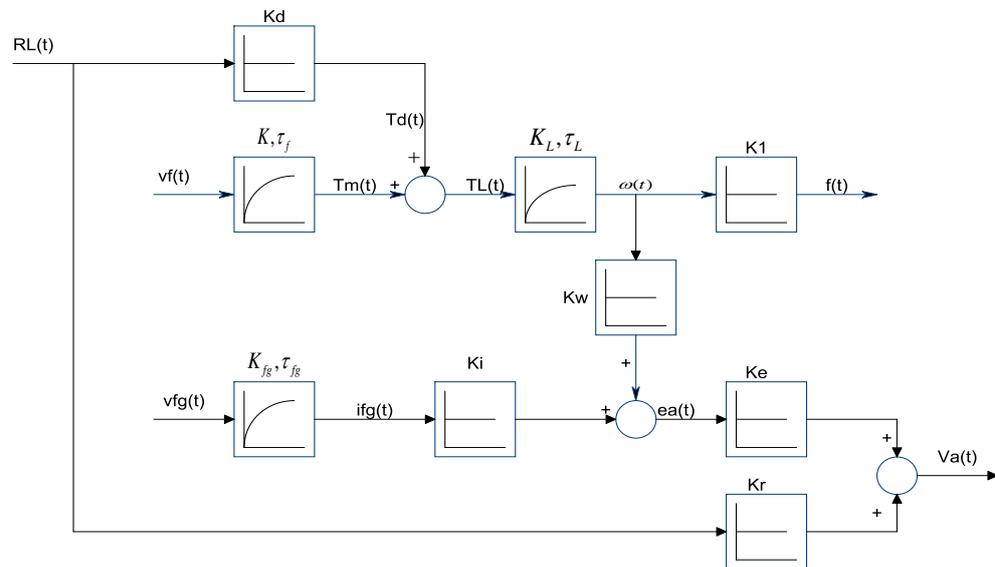


Figura 3.8 Diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje

De la figura 3.8 se puede determinar que las variables de salida del sistema frecuencia-voltaje, son la frecuencia y el voltaje, las variables de entrada son el voltaje de campo del motor que en este caso representa el voltaje de entrada al variador de frecuencia  $V_f(t)$  y el voltaje de campo del alternador  $V_{fg}(t)$ , existe una tercera variable de entrada que es la variación de la carga  $R_I(t)$ , esta representa la perturbación del sistema.

### 3.3.4 ECUACIONES DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN EL DOMINIO DEL PLANO COMPLEJO $s$ .

Para representar al sistema frecuencia-voltaje en el dominio del plano complejo  $s$  vamos a aplicar la herramienta matemática que se conoce

como la transformada de Laplace. Para aplicar esta herramienta las ecuaciones diferenciales deben cumplir con dos condiciones. [7]

1. Coeficientes constantes
2. Condiciones iniciales cero

Primero vamos a representar las ecuaciones del motor de corriente continua controlado por campo en el dominio de  $s$  entonces:

Al aplicar la transformada de Laplace en la ecuación 3.3 tenemos que:

$$\tau_f s T_m(s) + T_m(s) = K V_f(s)$$

$$\frac{T_m(s)}{V_f(s)} = \frac{K}{(\tau_f s + 1)}$$

Ecuación 3.18 Torque motor en función del voltaje de campo

Donde:

$T_m(s)$  Es el torque motor newton por metro [Nxm].

$V_f(s)$  Es el voltaje de campo del motor en voltios [V].

$\tau_f$  Es la constante de tiempo de campo del motor.

Al aplicar la transformada de Laplace a la ecuación 3.4 y recordando que el torque de perturbación es función de la variación de la carga, entonces.

$$T_m(s) - T_d(s) = T_L(s)$$

$$T_d(s) = K_d R_L(s)$$

$$T_m(s) - K_d R_L(s) = T_L(s)$$

Ecuación 3.19 Torque de carga en función del torque motor y de la variación de la carga

Dónde:

$T_m(s)$  Es el torque motor newton por metro [Nxm]

$T_d(s)$  Es el torque de perturbación newton por metro [Nxm]

$R_L(s)$  Es la variación de la carga en ohmios [ $\Omega$ ]

Al aplicar la transformada de Laplace en la ecuación 3.8 tenemos que:

$$\tau_L s \Omega(s) + \Omega(s) = K_L T_L(s)$$

$$\frac{\Omega(s)}{T_L(s)} = \frac{K_L}{\tau_L s + 1}$$

Ecuación 3.20 Velocidad en función del torque de carga

Dónde:

$\Omega(S)$  Es la velocidad a la que gira el motor en radianes-segundo [rad/s]

$T_L(S)$  Es el torque de la carga newton por metro [Nxm]

$\tau_L$  Es la constante de tiempo mecánica del motor

Al representar las expresiones del motor de corriente continua controlado por campo en diagrama de bloque, obtenemos el modelo matemático del motor de corriente continua controlado por campo tal como se muestra en la figura 3.9.

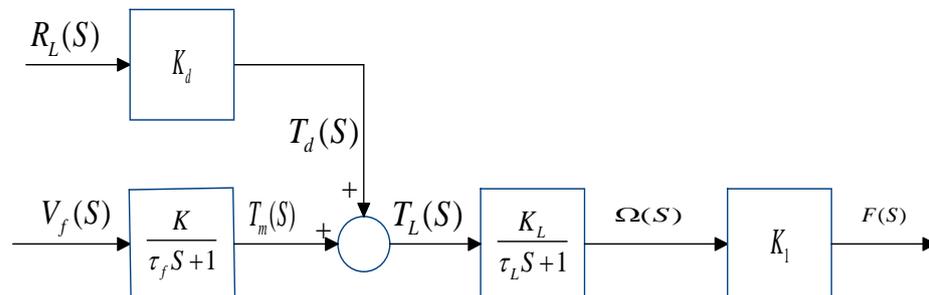


Figura 3.9 Diagrama de bloques del motor DC

Ahora vamos a representar las ecuaciones del generador sincrónico en el dominio de  $s$  entonces:

Al aplicar la transformada de Laplace a la ecuación 3.13 tenemos:

$$E_a(s) = K_i I_{fg}(s) + K_\omega \Omega(s)$$

Ecuación 3.21 Voltaje electromotriz en función de la corriente de campo del alternador y de la velocidad.

Dónde:

$E_a(s)$  Es el voltaje electromotriz en voltios [V]

$I_{fg}(s)$  Es la corriente de campo del generador en amperios [A]

$\Omega(s)$  Es la velocidad a la que gira el generador en ohmios [ $\Omega$ ]

Al aplicar la transformada de Laplace a la ecuación 3.14 tenemos que:

$$\tau_{fg} s I_{fg}(s) + I_{fg}(s) = K_{fg} V_{fg}(s)$$

$$\frac{I_{fg}(s)}{V_{fg}(s)} = \frac{K_{fg}}{\tau_{fg} s + 1}$$

Ecuación 3.22 Corriente de campo del alternador en función del voltaje de campo del alternador

Dónde:

$V_{fg}(s)$  Es el voltaje de campo del generador en voltios [V]

$I_{fg}(s)$  Es la corriente de campo del generador en amperios [A]

$\tau_{fg}$  Es la constante de tiempo del generador

Al aplicar la transformada de Laplace a la ecuación 3.16 tenemos:

$$V_a(s) = K_e E_a(s) + k_r R_L(s)$$

Ecuación 3.23 Voltaje de salida en función del voltaje electromotriz y de la variación de la carga.

Dónde:

$V_a(s)$  Es el voltaje generado en voltios [V]

$E_a(s)$  Es el voltaje electromotriz en voltios [V]

$R_L(s)$  Es la variación de la carga en ohmios [ $\Omega$ ]

Al representar las expresiones del generador DC en diagrama de bloque, obtenemos el modelo matemático del generador DC tal como se muestra en la figura 3.10.

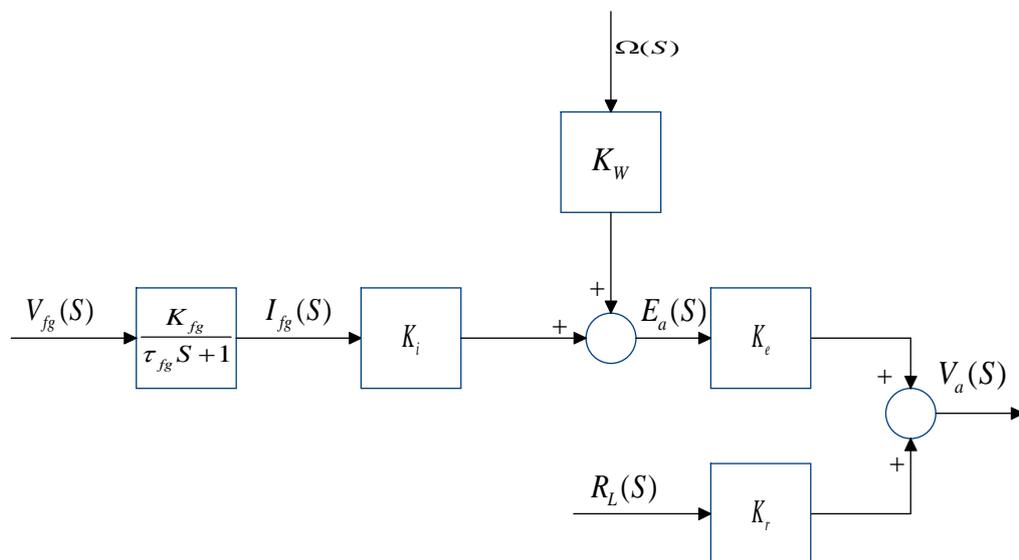


Figura 3.10 Diagrama de bloques del generador DC

### 3.3.5 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.

Al fusionar los gráficos del diagrama de bloques del generador de corriente continua controlado por campo que representa la turbina y el diagrama de bloques del generador DC que representa al alternador, obtenemos el diagrama de bloques del sistema frecuencia-voltaje como se muestra en la figura 3.11

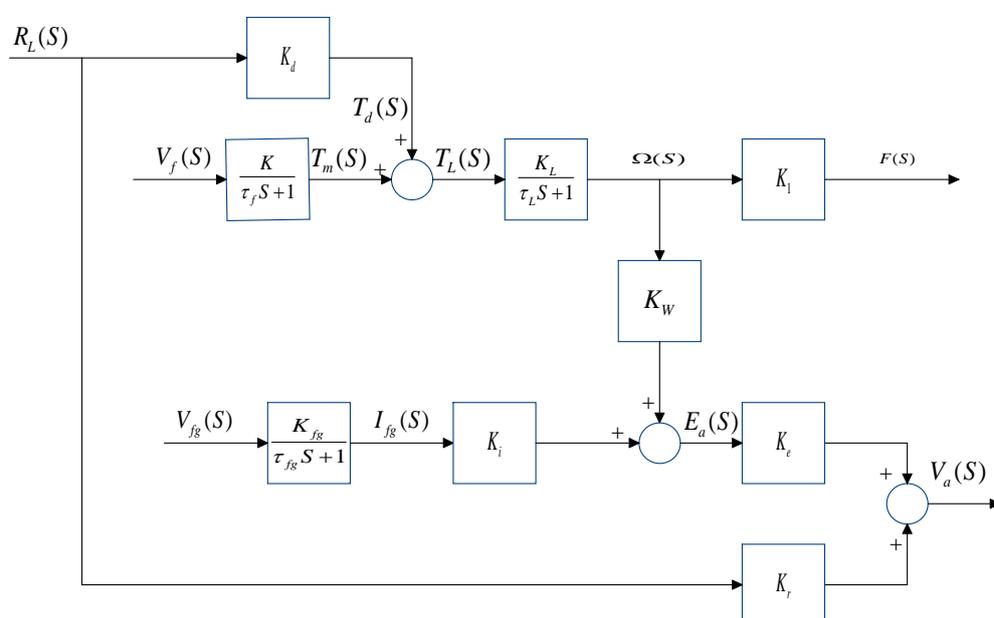


Figura 3.11 Diagrama de bloques del sistema frecuencia-voltaje

De igual manera como se mencionó en el diagrama funcional, en el diagrama de bloque del sistema frecuencia-voltaje se puede identificar cuáles son sus variables de salida, frecuencia  $f(s)$  y voltaje de salida  $V_a(s)$ . Sus variables de entrada, voltaje de campo del motor o

voltaje de entrada al variador de frecuencia  $V_f(s)$ , el voltaje de campo del alternador  $V_{fg}(s)$  y la variación de la carga  $R_I(s)$  que representa la señal de perturbación del sistema.

### 3.4 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN VARIABLES DE ESTADO POR MEDIO DEL MODELO MATEMÁTICO.

Para representar el sistema frecuencia-voltaje en variables de estado se inicia con las ecuaciones que describen la dinámica del sistema.

Ecuación 3.3 
$$\frac{dT_m}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} T_m(t) + \frac{K_f}{L_f} v_f(t)$$

Ecuación 3.8 
$$\frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{b}{J} \omega(t) + \frac{1}{J} (T_m(t) - K_d R_I(t))$$

Ecuación 3.9 
$$f(t) = K_1 \omega(t)$$

Ecuación 3.14 
$$\frac{di_{fg}(t)}{dt} = -\frac{R_{fg}}{L_{fg}} i_{fg}(t) + \frac{1}{L_{fg}} v_{fg}(t)$$

Ecuación 3.16 
$$v_a(t) = K_e K_w \omega(t) + K_e K_i i_{fg}(t) + k_r R_L(t)$$

El siguiente paso es representar estas ecuaciones en forma matricial de tal manera que tengan la siguiente forma:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_r u_r(t) + B_p u_p(t)$$

Ecuación 3.24 Ecuación diferencial de estados

$$y(t) = cx(t) + D_p u_p(t)$$

Ecuación 3.25 Ecuación de salida

Donde:

A es la matriz del sistema,

B<sub>r</sub> es la Matriz de Entradas,

B<sub>p</sub> es la matriz de entrada de perturbación,

C es la Matriz de Salidas,

D<sub>p</sub> es la matriz de salida de perturbación

x es el Vector de estados,

u<sub>r</sub> es el Vector de Entradas,

u<sub>p</sub> es el vector de entrada de perturbación,

y es el Vector de Salidas.

Expresando las ecuaciones en la forma de la ecuación diferencial de estado y en la forma de la ecuación de salida

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_m(t) \\ \dot{\omega}(t) \\ \dot{i}_{fg}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & 0 & 0 \\ \frac{1}{J} & -\frac{b}{J} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{fg}}{L_{fg}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_m(t) \\ \omega(t) \\ i_{fg}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_f}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{fg}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f(t) \\ v_{fg}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_d}{J} \\ 0 \end{bmatrix} [R_L(t)]$$

Ecuación 3.26 Representación matricial del sistema frecuencia-voltaje

$$\begin{bmatrix} f(t) \\ v_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & K_1 & 0 \\ 0 & K_e K_w & K_e K_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_m(t) \\ \omega(t) \\ i_{fg}(t) \end{bmatrix} + [k_r][R_L(t)]$$

Ecuación 3.27 Ecuación de salida del sistema frecuencia-voltaje

De la ecuación 3.26 y 3.27 se puede deducir que:

El torque motor  $T_m(t)$ , la velocidad angular  $\omega(t)$  y la corriente de campo del alternador  $i_{fg}(t)$  son las variables de estado del sistema. El voltaje del variador de frecuencia  $v_f(t)$  y el voltaje de campo del alternador  $v_{fg}(t)$  son las variables de entrada del sistema. La variación de la carga  $R_L(t)$  es la perturbación del sistema. La frecuencia  $f(t)$  y el voltaje de salida  $v_a(t)$  son las variables de salida.

### 3.5 SIMULACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN MATLAB SIMULINK.

Para observar el comportamiento dinámico del sistema frente a variaciones en las entradas y variaciones en la carga, simulamos el diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje en el SimulinkdeMatlab para lo cual se hace uso del toolbox modelo matemático [8] tal como se muestra en la figura 3.12.

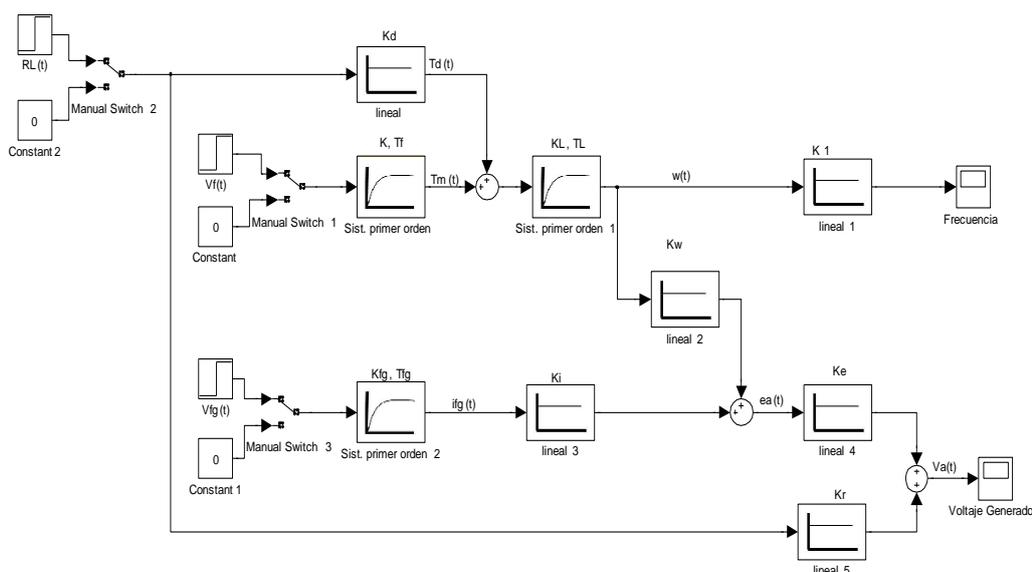


Figura 3.12 Diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje en Simulink

Las pruebas que se realizan son las siguientes:

- Variación de voltaje de campo del motor  $v_f(t)$  manteniendo constante el voltaje de campo del alternador  $v_{fg}(t)$  y la carga  $R_L(t)$ .
- Variación del voltaje de campo del alternador  $v_{fg}(t)$  manteniendo constante el voltaje de campo del motor  $v_f(t)$  y la carga  $R_L(t)$ .
- Variación de la carga  $R_L(t)$  manteniendo constante el voltaje de campo del alternador  $v_{fg}(t)$  y el voltaje de campo del motor  $v_f(t)$ .

### **3.5.1 SIMULACIÓN DEL SISTEMA VARIANDO EL VOLTAJE DE CAMPO DEL MOTOR $v_f(t)$ MANTENIENDO CONSTANTE EL VOLTAJE DE CAMPO DEL ALTERNADOR $v_{fg}(t)$ Y LA CARGA $R_L(t)$ .**

En la figura 3.13 se muestra el diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje donde se puede observar que para mantener constante el voltaje de campo del alternador  $v_{fg}(t)$  y la carga  $R_L(t)$  ubicamos los bloques manual switch dos y tres en la posición que se muestra en la figura 3.13, para realizar la variación del voltaje de campo del motor  $v_f(t)$  usamos el bloque step configurado de la siguiente manera:

Step time: 0.5, Initial value: 0, Final value: 0.5

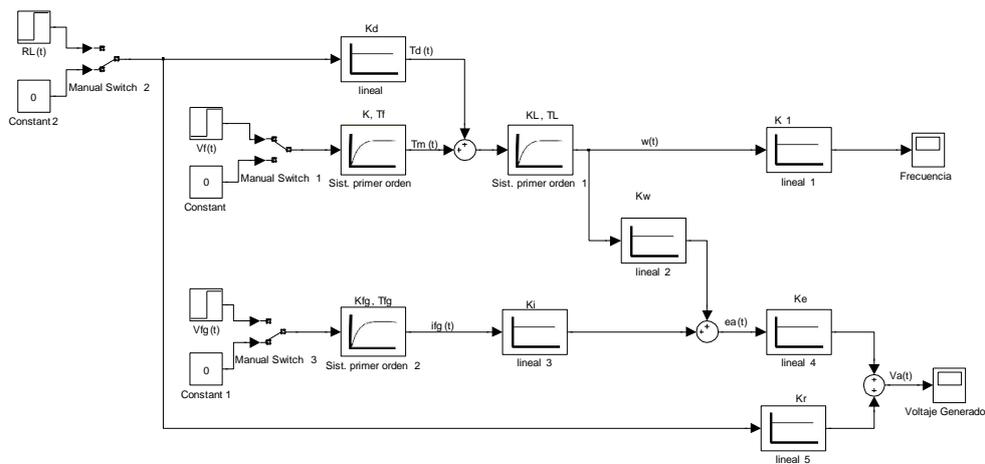


Figura 3.13 Diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje cuando se produce una variación en el voltaje de campo del motor manteniendo constante el voltaje de campo del alternador y la variación de la carga.

Los resultados de la simulación se los observa en la figura 3.14, donde podemos apreciar como ambas variables de salida, frecuencia y voltaje se ven afectados en forma directamente proporcional por el cambio en el voltaje de campo del motor.

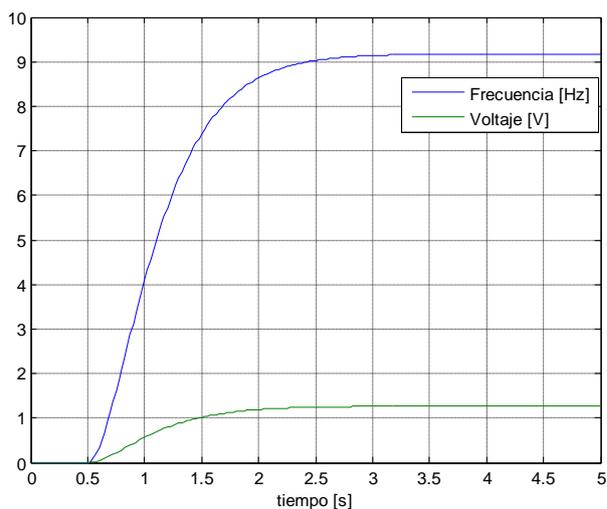


Figura 3.14 Frecuencia y voltaje generados al variar el voltaje de campo del motor.

### 3.5.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA VARIANDO EL VOLTAJE DE CAMPO DEL ALTERNADOR $v_{fg}(t)$ MANTENIENDO CONSTANTE EL VOLTAJE DE CAMPO DEL MOTOR $v_f(t)$ Y LA CARGA $R_L(t)$ .

En la figura 3.15 se muestra el diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje donde se puede observar que para mantener constante el voltaje de campo del motor  $v_f(t)$  y la carga  $R_L(t)$  ubicamos los bloques manual switch uno y dos en la posición que se muestra en la figura 3.15, para realizar la variación en el voltaje de campo del alternador  $v_{fg}(t)$  usamos el bloque step configurado de la siguiente manera:

Step time: 1, Initial value: 0, Final value: 1

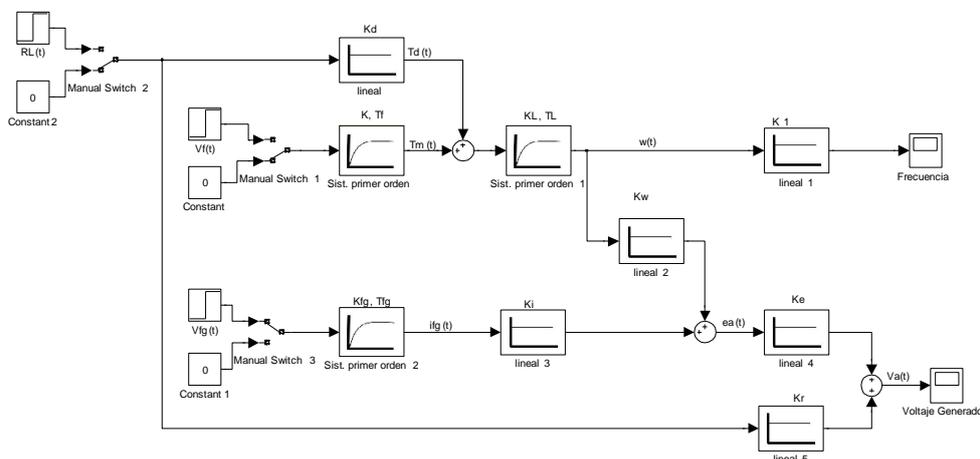


Figura 3.15 Diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje cuando se produce una variación en el voltaje de campo del alternador manteniendo constante el voltaje de campo del motor y la variación de la carga

De la figura 3.16 se puede deducir que la frecuencia no se ve alterada por el cambio en el voltaje de campo del generador, en realidad si se produce una variación en la frecuencia pero es despreciable, en cambio sucede lo contrario con el voltaje generado, donde esta variable se va afectada en forma directamente proporcional con el voltaje de campo del alternador.

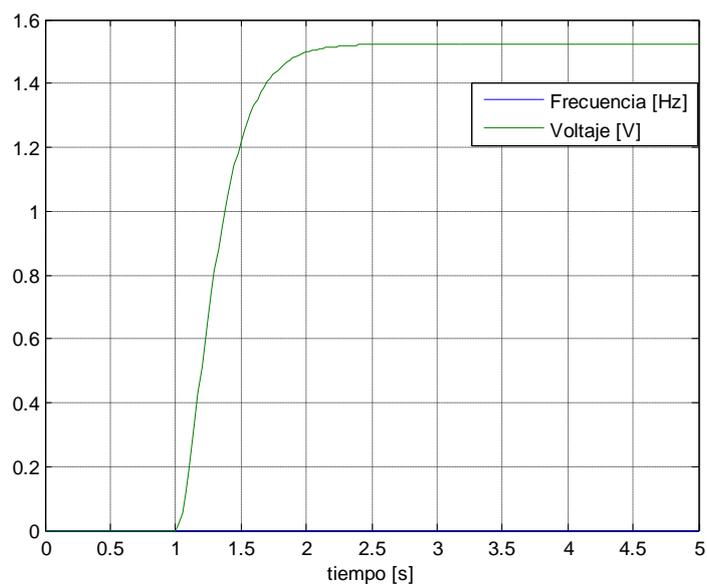


Figura 3.16 Frecuencia y voltajes generados al variar el voltaje de campo del alternador

### 3.5.3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA VARIANDO LA CARGA $R_L(t)$ MANTENIENDO CONSTANTE EL VOLTAJE DE CAMPO DEL ALTERNADOR $v_{fg}(t)$ Y EL VOLTAJE DE CAMPO DEL MOTOR $V_f(t)$ .

En la figura 3.17 se muestra el diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje donde se puede observar que para mantener constante el voltaje de campo del motor  $v_f(t)$  y el voltaje de campo del alternador  $v_{fg}(t)$  ubicamos los bloques manual switch uno y tres en la posición que se muestra en la figura 3.17, para realizar la variación en la carga  $R_L(t)$  usamos el bloque step configurado de la siguiente manera:

Step time: 1, Initial value: 0, Final value: 0

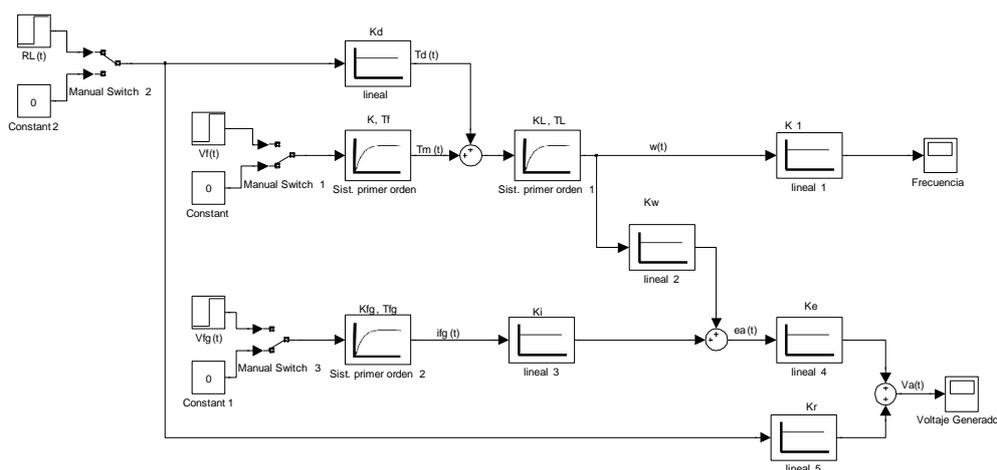


Figura 3.17 Diagrama funcional del sistema frecuencia-voltaje cuando se produce una variación en la carga manteniendo constante el voltaje de campo del motor y el voltaje de campo del alternador.

De la figura 3.18 se puede concluir que debido a la variación en la carga, que representa la perturbación para el sistema, ambas variables frecuencia y voltaje son inversamente proporcionales a la variación en la carga.

Esto es lo que realmente sucede en las centrales de generación eléctrica, donde al aumentar la carga del sistema, tanto la frecuencia que está ligada a la potencia mecánica de la turbina como el voltaje que está relacionado con la potencia reactiva del campo del alternador disminuye.

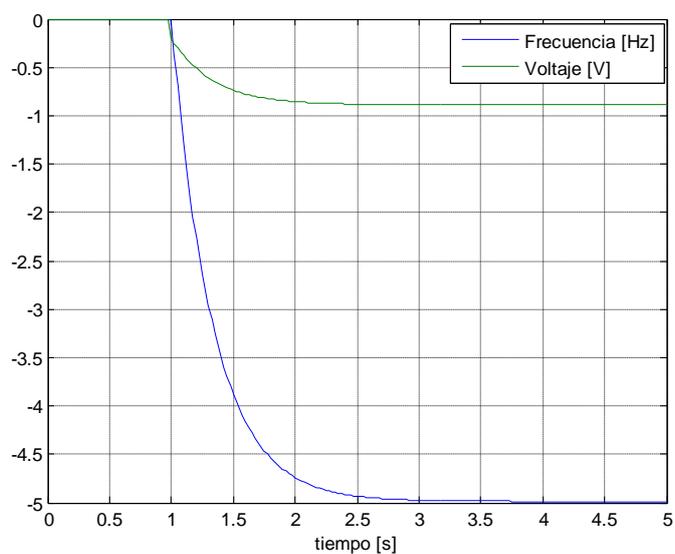


Figura 3.18 Frecuencia y voltajes generados al realizar variación en la carga.

Por medio de este análisis podemos concluir que:

- El sistema frecuencia-voltaje se comporta de manera estable variando cualquiera de las variables de entrada.
- Las variables de frecuencia y voltaje de salida son directamente proporcionales al voltaje de campo del motor que representa al voltaje de entrada al variador de frecuencia.
- La variable de voltaje generado es directamente proporcional al voltaje de campo del alternador.
- Las variables de frecuencia y voltaje de salida son inversamente proporcional a la variación de carga del sistema.

## **CAPÍTULO 4**

### **4 IMPLEMENTACIÓN**

#### **4.1 CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBA**

Consiste de un módulo metálico construido en plancha de hierro galvanizado de 1.4 mm, con pintura de acabado Beige RAL 7032. La figura 4.1 muestra al banco de prueba construido y se puede observar que la estructura está compuesta por:

- un panel colocado en la parte superior, donde se instala la parte eléctrica del sistema.
- una base metálica ubicada en la parte inferior, donde se instala la parte mecánica del sistema.



Figura 4.1 Banco de prueba del sistema frecuencia-voltaje

## 4.2 CONSTRUCCIÓN DE LA PARTE ELÉCTRICA DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE

La parte eléctrica del sistema, instalado en el panel de control, consta de los elementos considerados en el diseño eléctrico del sistema. En la figura 4.2 la foto 1 muestra las botonera de encendido, apagado, las luces pilotos encendido, apagado. La foto dos muestra las conexiones de

los elementos del diagrama de control. La foto tres muestra el interruptor principal, el selector manual-automático, los potenciómetros para el control manual del sistema y la tarjeta conectora CB-68LPR que conecta el banco de prueba con el cFP. La foto cuatro muestra la carga trifásica del sistema, compuesta por las resistencias fijas conectadas en configuración Y paralelo con el reóstato trifásico (VARIAC).

Foto1



Foto 2

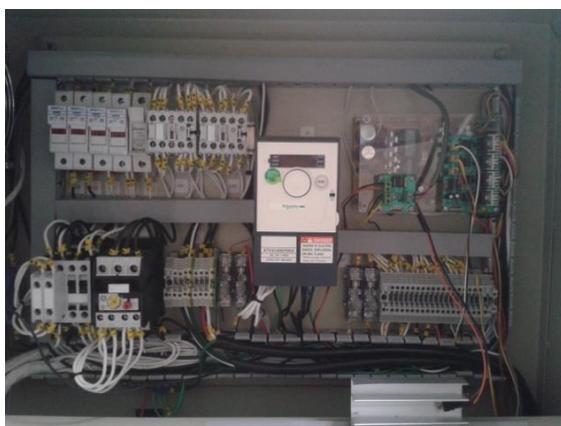


Foto 3



Foto 4



Figura 4.2 Panel de control del sistema frecuencia-voltaje

### 4.3 CONSTRUCCIÓN DE LA PARTE MECÁNICA DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE

La parte mecánica consta de los siguientes acoples:

Acople motor-alternador.- Necesario para transmitir la potencia del motor al alternador, se lo realiza por dos poleas dentadas de ocho centímetros de diámetro, un templador y una banda. En la figura 4.3 se muestra el acople motor alternador.



Figura 4.3 Acople motor-alternador

Acople motor-encoder.- Realizado directamente en el eje del motor de inducción y el eje del encoder, con el objetivo de medir la velocidad del motor.



Figura 4.4 Acople motor-encoder

Acople motor de paso-reóstato trifásico.- Realizado directamente entre el eje del motor de paso y el eje del reóstato trifásico, para simular variaciones de carga del sistema. El reóstato posee una protección, que desactiva por medio de un Switch al motor de paso, evitando el aumento excesivo de carga que puede provocar un cortocircuito. En la figura 4.5 se muestra dicho acople.

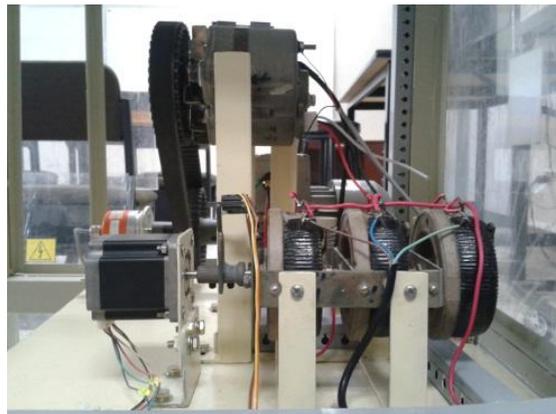


Figura 4.5 Acople motor de paso reóstato trifásico

#### 4.4 AJUSTE DE LOS PARAMETROS DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

El variador de frecuencia está ajustado con los parámetros mostrados en la tabla 4.1. [9]

Menú	Código	Descripción	Ajuste
drC- [control del motor]	bFr	Frecuencia estándar del motor (Hz)	60
	UnS	Tension nominal del motor (v)	220
	FrS	Frecuencia nominal del motor (Hz)	60
	nCr	Corriente nominal del motor (A)	1.9
	nSP	Velocidad nominal del motor (rpm)	1590
	COS	cos $\phi$ nominal del motor	0.81
	tUn	Autoajustes para parametros UnS, FrS, nCr, nSP, COS	no
SEt- [ajustes]	RCC	tiempo de aceleración (s)	3
	dEC	tiempo de desaceleracion (s)	3
	LSP	frecuencia de motor con referencia min (Hz)	0

---

9Tomada de la guía de programación ATV-302 - en línea [http://download.schneider-electric.com/files?p\\_File\\_Id=27535390&p\\_File\\_Name=ATV312\\_programming\\_manual\\_S\\_P\\_BBV46387\\_02.pdf](http://download.schneider-electric.com/files?p_File_Id=27535390&p_File_Name=ATV312_programming_manual_S_P_BBV46387_02.pdf)

	HSP	frecuencia de motor con referencia max (Hz)	60
	ItH	Corriente nominal del motor (A)	1.9
I-O- [entrad salida.]	rrS	Asignacion de marcha atrás	LI2
Fun->PSS- [velocidad preselecc.]	PS2	velocidades preseleccionadas	LI3
	PS4	velocidades preseleccionadas	LI4
Fun-> SRI- [Entradas sumatorias]	SA2	Entrada analógica	AI2
CtL [control]	FrI	control de referencia	AI1
I-O- [entrad salida.]	tCC	control de comandos	2C

Tabla 4.1 Ajuste de los parámetros del variador de frecuencia

#### 4.5 AJUSTE DE LAS CONEXIONES DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO.

El motor trifásico de inducción marca SIEMENS de 0.5 hp, posee borneras para configurar el nivel de tensión adecuado en los terminales del motor. Existen dos tipos de configuraciones disponibles 208-220 V en

una configuración YY y 440 V en una configuración Y, el nivel de tensión existente en el laboratorio de control automático es de 208V, por lo tanto el diagrama de conexión utilizado es mostrado en la figura 4.6 [10].

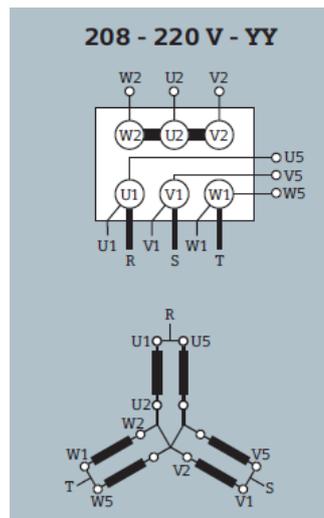


Figura 4.6 Diagrama de conexiones del motor trifásico.

#### 4.6 AJUSTE DE LAS CONEXIONES DEL ENCODER.

El encoder utilizado es de tipo incremental con una resolución de 250 pulsos por revolución, posee en total cinco terminales para realizar las

---

10 Tomado del manual motores trifásicos de inducción Siemens, en línea [http://prof.usb.ve/jaller/Guia\\_Maq\\_pdf/cat\\_motores\\_ind.pdf](http://prof.usb.ve/jaller/Guia_Maq_pdf/cat_motores_ind.pdf)

conexiones, la asignación de los terminales del encoder se muestra en la tabla 4.2. [11]

Señal	0 V	+U <sub>b</sub>	A	B	0 or. 0
# de terminal	1	2	3	4	5
Color	Blanco	Café	Verde	Amarillo	Gris

Tabla 4.2 Asignación de terminales del encoder incremental

Con referencia a la tabla 4.2, el terminal 1 corresponde al terminal de cero voltios, el terminal 2 es el de alimentación del encoder, en este caso 24 V DC, los terminales 3 y 4, también conocidos como canales A y B respectivamente, de ellos se obtiene la señal de 250 pulsos por revolución, la única diferencia es el desfase que existe en ambos canales, el terminal 5 o de referencia, sirve de referencia para ambos canales A y B con el objetivo de determinar su dirección de giro.

En el caso del sistema frecuencia-voltaje solo se necesita medir la velocidad de giro del motor, por tal motivo se utiliza los terminales 1 y 2 para alimentar el encoder y el terminal 3 para obtener los pulsos por revolución para luego transformarlos a rpm.

#### 4.7 CONEXIONES EN EL cFP.

El Controlador de Automatización Programable (PAC), Compact FieldPoint “cFP”, de la National Instruments, es un dispositivo altamente expandible y fácil de usar compuesto de módulos E/S robustos así como de interfaces de comunicación inteligentes. [12]

La comunicación entre el sistema frecuencia-voltaje y el cFP es realizada por el bloque conector CB\_68LPR a través del cable conector SH68-68-D1, en la figura 4.7 se muestra la conexión entre el sistema frecuencia-voltaje y el cFP.

Los módulos utilizados, los canales asignados a cada módulo, el nombre de cada señal, el rango de señal permitido en dicho canal, el número de terminal en el bloque conector del cFP y la marquilla se muestran en la tabla 4.3. Por ejemplo en la marquilla 20529, el primer número indica el canal, el segundo y tercer número indica el terminal de conexión en el bloque conector del cFP, el tercer y cuarto número indica el terminal de conexión en el bloque conector CB\_68LPR.

---

<sup>12</sup>Material común para pre-práctica 2 A-B, identificación de sistemas, usando Matlab a través del cFP 2100, laboratorio de control automático FiecEspol- en línea <http://www.jdelpozo.espol.edu.ec/web/herramientas/referencias.asp>



Figura 4.7 Figura 3.19 Conexión del sistema frecuencia-voltaje y el cFP.

Módulo	Canal	Nombre de la señal	Rango	Tipo de Terminal	Terminal	Marquilla
AI-100	2	Voltaje generado	0-36 [V]DC	Vin	5	20529
				COM	22	22228
AO-210	3	Voltaje campo alternador	0-10.2 [V]DC	Vout	7	30761
				COM	8	30862
AO-210	4	Voltaje variador de frecuencia	0-10.2 [V]DC	Vout	9	40959
				COM	10	41060
AO-210	5	Perturbación	0-10.2 [V]DC	Vout	11	51163
				COM	12	51264
RLY-421	6	Run VF	0-1 (booleano)	NO	13	61357
				IC	14	61458

RLY-421	5	On/off	0-1 (Boleano)	NO	11	51123
				IC	12	51223
CTR-502	0	Velocidad	0-65535 (count)	Vin	1	00146
				Vsup	17	01726
				COM	18	01812

Tabla 4.3 Conexiones en el cFP.

## **CAPÍTULO 5**

### **5 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **5.1 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN MATLAB SIMULINK.**

Para controlar el sistema con la representación del sistema frecuencia-voltaje en variables de estado por medio del modelo matemático analizada en la sección 3.4, se producen algunos inconvenientes, debido que existen tres variables de estado de las cuales dos son sensadas, la velocidad y la corriente, la tercera variable de estado tiene que ser estimada por un observador. Para crear el observador se necesita conocer las matrices A, B y C, estas matrices contienen parámetro que se pueden determinar por medio de pruebas realizadas a cada uno de los componentes del sistema, el problema se presenta en el momento que se pretende calcular la inercia y la fricción del sistema, que no se pudo determinar por medio de pruebas. Una de las soluciones puede ser

Instalar un sensor que mida el torque, lo cual complica el asunto, porque primero, se tendría que buscar si existe tal sensor en el mercado local, segundo, al instalar el sensor, se tendría que rediseñar la planta.

Para resolver esta problemática se procede a construir un modelo en el SIMULINK de MATLAB y por medio de pruebas que se realizan alrededor de un punto de operación seleccionado, se adquiere datos de la planta con el objetivo de conocer su dinámica y poder obtener las funciones de transferencia por medio de la herramienta IDENT DE MATLAB.[13] Por último estas funciones de transferencia son representadas en grafo de flujo de señal en variable de fase, luego en variables de estado para realizar el control del sistema.

## 5.2 ELECCIÓN DEL PUNTO DE OPERACIÓN

El criterio para elegir el punto de operación se basa en que el sistema frecuencia-voltaje trabaje en condiciones donde tenga un comportamiento aproximado al lineal para que pueda ser linearizado.

En total son tres puntos de operación que hay que seleccionar. El primero corresponde a los rpm del alternador, se elige una velocidad  $\omega$  de 1525 [rpm] porque en los datos de placa del alternador se especifica que la

---

<sup>13</sup>Ident (Systemidentificationtool) proporciona un entorno interactivo para análisis de datos, la estimación del modelo y visualización de respuestas; tomado del help de matlab

velocidad mínima que debe girar el rotor es 1270 rpm. Los 1525 rpm corresponde a un voltaje de entrada al variador de frecuencia de 9 [V], lo que me da cierto rango para poder controlar el sistema cuando existe una perturbación, este se debe a que el máximo valor de entrada es de 10 [V].

El segundo corresponde al voltaje de salida del alternador que se genera para un valor voltaje de campo del alternador de operación. El punto de operación se elige en base a la prueba de circuito abierto, que se desarrolla manteniendo, la velocidad  $\omega$  de operación, los terminales del estator en circuito abierto y variando el voltaje de entrada de campo del alternador  $V_{fg}$ .

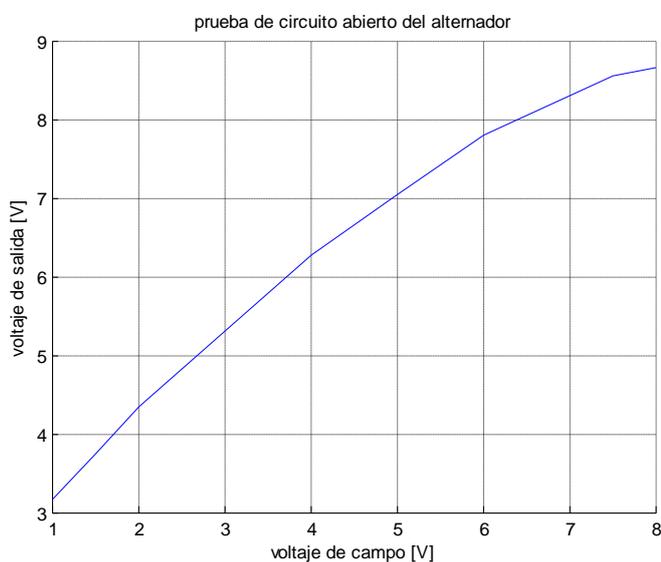


Figura 5.1 Prueba de circuito abierto del alternador

El punto de operación se lo escoge de tal manera que el alternador no trabaje en zona de saturación, por tal motivo de la figura 5.1 se escoge un valor de operación para el voltaje de campo del alternador de 5 [V].

El tercero corresponde al punto de operación de la carga, este se selecciona en base a la capacidad de generación del alternador, 537 watts. El valor de perturbación elegido es de 3.5 [V], esto produce una carga total de 1.33  $\Omega$  y genera un consumo de 253 watts, dejando una reserva de potencia entregada por el alternador para realizar las pruebas de perturbación del sistema.

### **5.3 IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK DEL MODELO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.**

Para la adquisición de datos de la planta, se elabora el modelo en SIMULINK mostrado en la Figura 5.2, el cual tendrá como características principales: generar señales de arranque y paro, generar señal de prueba, leer y escribir datos en el cFPa través del servidor OPC, [14] y transferir los datos al workspace de MATLAB.

---

14 Servidor OPC es un programa que permite obtener/enviar datos desde/hacia dispositivos de adquisición de datos como por ejemplo el Compact Field Point.

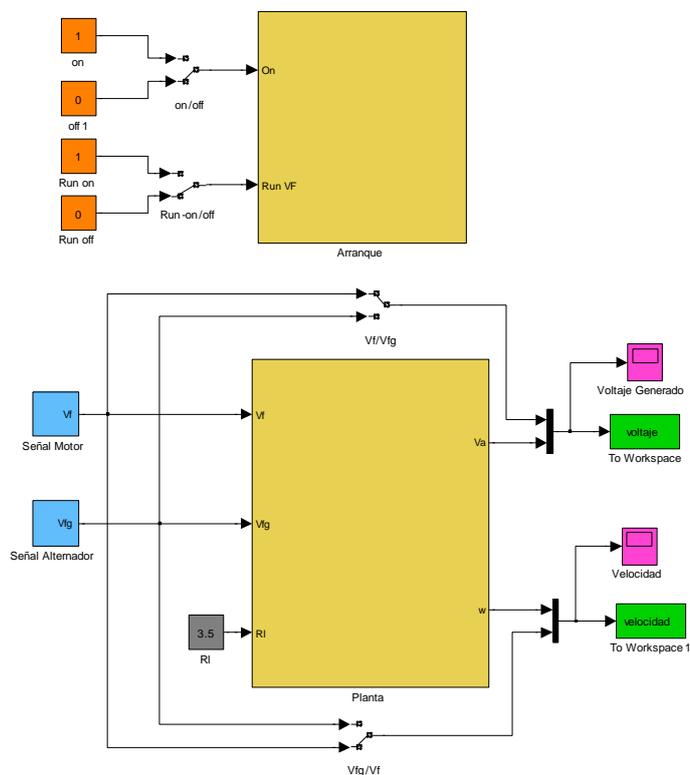


Figura 5.2 Modelo en SIMULINK para la adquisición de datos

Los bloques en color naranja de la Figura 5.2 permiten generar las señales de paro y arranque del sistema. La entrada On sirve para energizar la planta y la entrada Run VF sirve para enviarle una señal de arranque al variador de frecuencia.

Los bloques color celeste son los subsistemas, señal motor y señal alternador como se muestran en la figura 5.3. Lo que se desea realizar es arrancar la planta y llevarla al punto de operación para luego por

medio del bloque Manual Switch someterla a prueba con una señal tipo tren de pulsos que oscila alrededor del punto de operación.

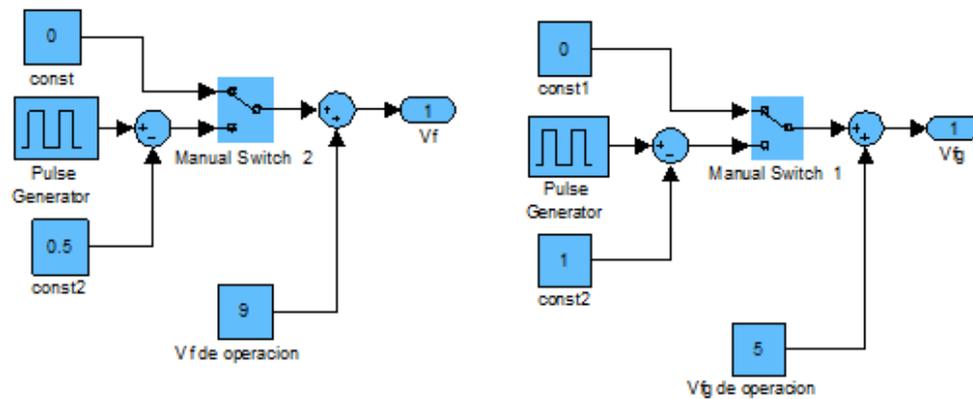


Figura 5.3 Subsistemas señal motor y señal alternador

El bloque de color gris de la figura 5.2 representa la señal de variación de la carga o perturbación del sistema  $R_L(t)$  que se encuentra ajustada en su punto de operación. También se utiliza un osciloscopio para poder observar las señales de salida respectivamente.

Los bloques `workspace` que están de color verde en la figura 5.2 sirven para guardar los datos de entrada y salida del sistema frecuencia-voltaje. Estos datos son guardados en el `workspace` de matlab en forma de arreglos para luego ser usados al realizar la identificación.

El bloque Arranque de la figura 5.2 es un subsistema que interactúa con el OPC para poder enviar las señales de encendido a la planta y de arranque al variador de frecuencia como se muestra en la figura 5.4.

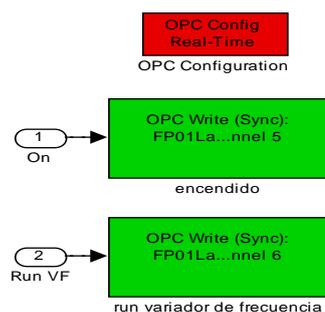


Figura 5.4 Subsistema arranque

El bloque Planta de la figura 5.2 es un subsistema que interactúa con el OPC como se muestra en la figura 5.5, donde se observa que los tres bloques de color verde son de escritura es decir sirve para enviar señales a la planta, los dos bloques de color naranja son de lectura y sirven para leer las señales de los sensores, y el bloque de color magenta que convierte los pulsos medidos en unidades de velocidad rpm.

Los bloques de escritura son:

Control campo.- Para enviar señal analógica de 0-8 volts al campo del alternador.

Control velocidad.- Para enviar señal de 0-10 volts al variador de frecuencia.

Control carga.- Para enviar señal analógica de 0-4 volts para variar la carga.

Los bloques de lectura son:

Voltaje de salida.- Para leer la señal del voltaje generado

Pulsos.- Para leer los pulsos generados por el encoder o sensor de velocidad.

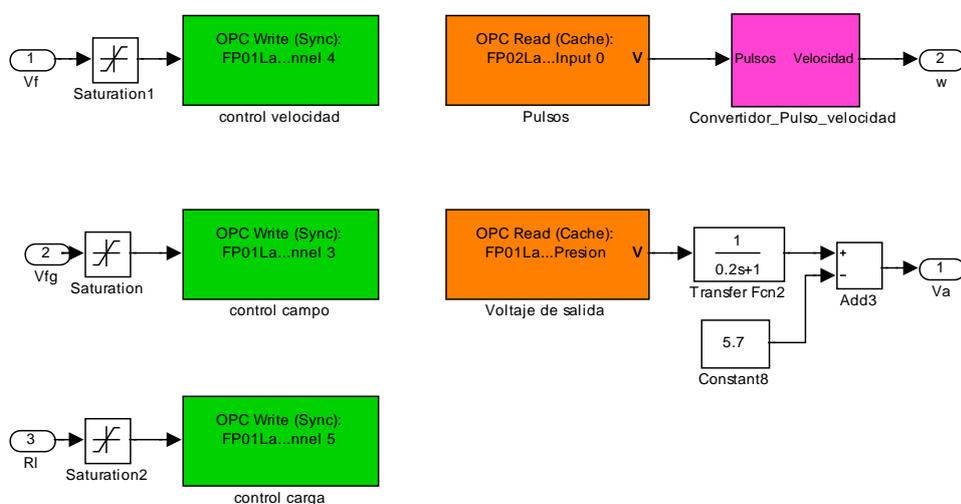


Figura 5.5 Subsistema planta

En la figura 5.6 se muestra el subsistema convertidor\_Pulso\_Velocidad que como su nombre lo indica procesa la señal del encoder o sensor de velocidad y la transforma en unidades de velocidad o rpm

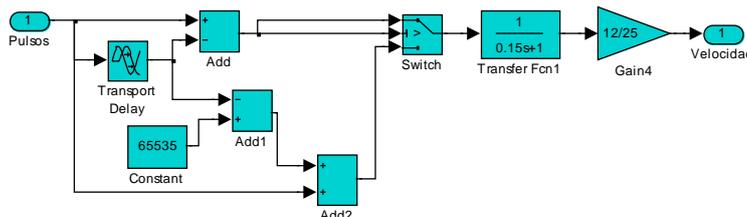


Figura 5.6 Subsistema convertidor\_Pulso\_Velocidad

El subsistema de la figura 5.6 primero retarda la señal del encoder en 0.5 segundos por medio del transportdelay obteniendo  $p$  pulsos cada 0.5 segundos, la forma para transformar esta señal en revoluciones por minutos es la siguiente.

$$\frac{p \text{ pulsos}}{0.5 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ revolución}}{250 \text{ pulsos}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}$$

Considerando que el encoder genera 250 pulsos por cada revolución, el factor que transforma los pulsos/s en rpm/min es 12/25.

El bloque transfer fcn1 de la figura 5.6 sirve como filtro para contrarrestar el efecto de la vibración en el sistema. En este subsistema también se considera el efecto del reseteo del contador, cada 65535 pulsos del módulo contador ctr-502.

La configuración de cada uno de los bloques OPC se muestra en el anexo B.

### **5.3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.**

Usando el modelo de la Figura 5.1 se realiza la adquisición de los datos de entrada vs datos de salida del sistema, que consta de dos partes.

La primera parte consiste en llevar la planta al punto de operación. Luego manteniendo constante la señal del alternador y la señal de perturbación RI, se realiza variaciones con una entrada tipo tren de pulso que oscila alrededor del punto de operación en la señal del campo del motor o variador de frecuencia. Por último se realiza la adquisición de datos de la señal del variador de frecuencia y de las dos señales de salida como se muestra en la figura 5.7

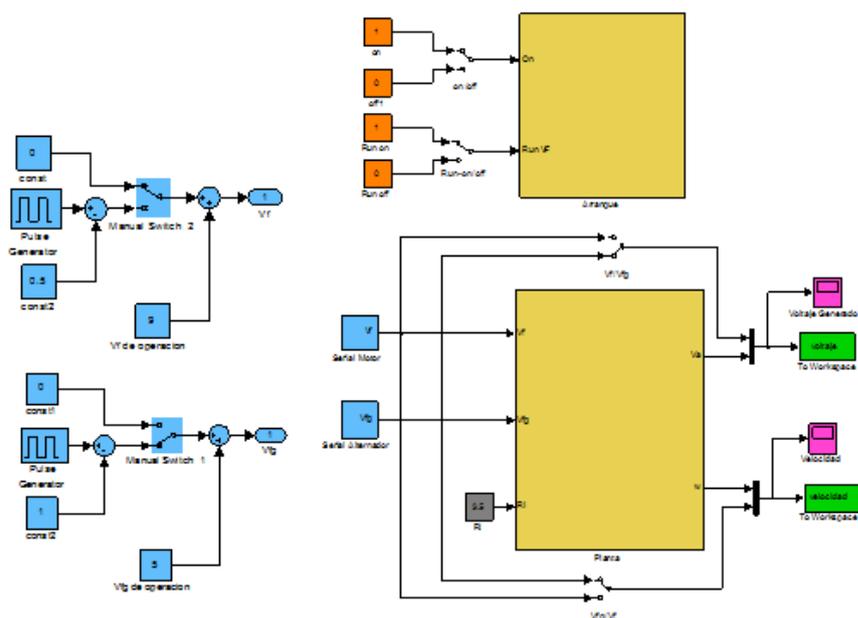


Figura 5.7 a) subsistema señal alternador y señal motor, b) Configuración del diagrama de bloque para la adquisición de datos parte 1

Los datos adquiridos se muestran en esta parte se muestran en el anexo E.

La segunda parte al igual que la primera consiste en llevar la planta al punto de operación, ahora manteniendo constante la señal del variador de frecuencia  $V_f$  y la señal de perturbación  $R_i$ . Se realiza variaciones con una entrada tipo tren de pulso que oscila alrededor del punto de operación en la señal de campo del alternador  $V_{fg}$ . Por último se realiza la adquisición de datos de la señal del campo del alternador y de las dos señales de salida como se muestra en la figura 5.8

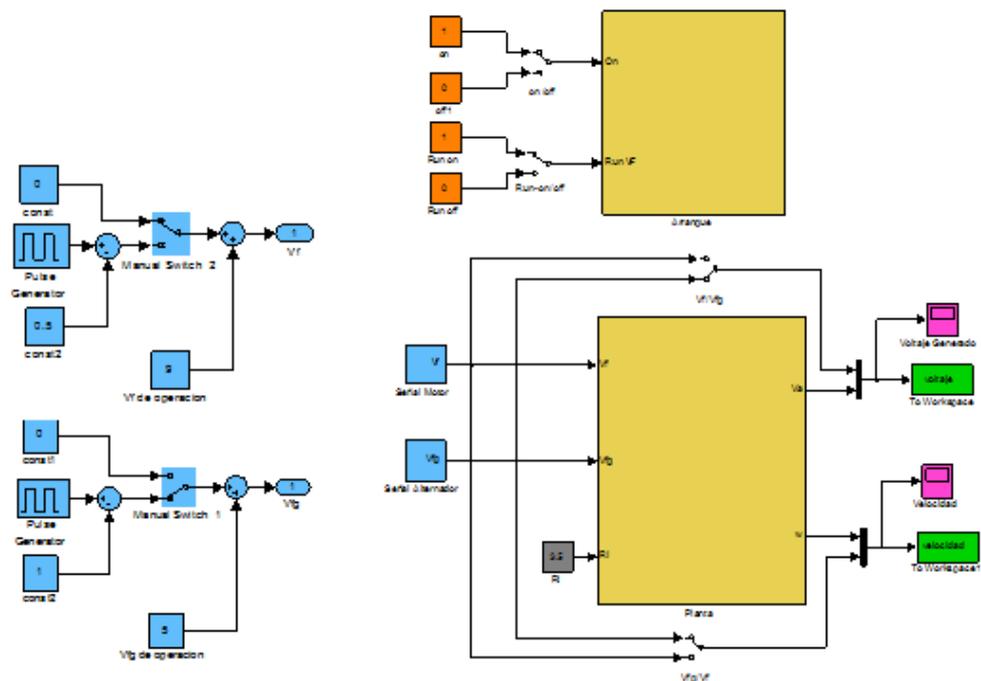


Figura 5.8 a) subsistema señal alternador y señal motor, b) Configuración del diagrama de bloque para la adquisición de datos parte 2

Los datos adquiridos se muestran en el Anexo E.

### 5.3.2 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE.

Para determinar las funciones de transferencia de la planta, el toolbox de systemidentification (IDENT) 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 en la entrada-salida del sistema [15].

Systemidentification 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. El procedimiento para realizar la identificación por medio del toolboxsystemidentification se muestra en el anexo E.

Los datos que se van a utilizar para realizar la identificación se adquirieron en la sección anterior. En total se van a obtener cuatro funciones de transferencia con estos datos.

La primera función de transferencia es la relación velocidad vs voltaje del variador de frecuencia o voltaje de campo del motor manteniendo constante la señal del alternador. En la ecuación 5.1 se expresa la función de transferencia con un porcentaje de aproximación del 80%

$$\frac{\omega}{V_f} = \frac{K_1}{(s + p_1)(s + p_2)}$$

Ecuación 5.1 Función de transferencia velocidad vs voltaje motor

Dónde:

$$k_1 = 1673.2553$$

$$p_1 = 3.035$$

$$p_2 = 3.008$$

La segunda función de transferencia es la relación velocidad vs voltaje de campo del alternador, manteniendo constante la señal del variador de frecuencia. En la ecuación 5.2 se expresa la función de transferencia con un porcentaje de aproximación del 65%.

$$\frac{\omega}{V_{fg}} = \frac{K_2}{(s + p_3)(s + p_4)}$$

Ecuación 5.2 Función de transferencia velocidad vs voltaje alternador

Dónde:

$$k_2 = -314.7891$$

$$p_3 = 4.066$$

$$p_4 = 3.069$$

La tercera función de transferencia es la relación voltaje generado vs voltaje del variador de frecuencia, manteniendo constante la señal de

campo del alternador. En la ecuación 5.3 se expresa la función de transferencia con un porcentaje de aproximación del 77%.

$$\frac{V_a}{V_f} = \frac{K_3}{(s + p_5)(s + p_6)}$$

Ecuación 5.3 Función de transferencia voltaje generado vs voltaje motor

Dónde:

$$k_3 = 18.7866$$

$$p_5 = 4.237$$

$$p_6 = 3.515$$

La cuarta es la relación voltaje generado vs voltaje de campo del alternador, manteniendo constante la señal del variador de frecuencia. En la ecuación 5.4 se expresa la función de transferencia con un porcentaje de aproximación del 84%.

$$\frac{V_a}{V_{fg}} = \frac{K_4}{(s + p_7)(s + p_8)}$$

Ecuación 5.4 Función de transferencia voltaje generado vs voltaje alternador

Dónde:

$$k_4 = 54.4212$$

$$p_7 = 5.976$$

$$p_8 = 5.975$$

Las funciones de transferencia de velocidad vs señal de perturbación y voltaje de salida vs voltaje de perturbación no pueden ser obtenidas por este procedimiento, debido a que un cambio tipo escalón en la entrada de la señal de perturbación RI acciona un motor de paso que esta acoplado con el reóstato trifásico, este accionamiento induce al motor girar a una velocidad constante haciendo que la carga varíe como una función tipo rampa, como consecuencia con el método que se está utilizando no podemos modelar matemáticamente pero si se puede determinar el efecto que causa la perturbación en las variables de salida en estado estable.

En la figura 5.9 se muestra la respuestas de la velocidad y del voltaje cuando el sistema frecuencia- voltaje es perturbado. En esta prueba se inicia con el sistema operando en su punto de operación, con un valor de voltaje de carga o de perturbación de 3.5 [V], Luego se produce un cambio tipo escalón en la entrada de la señal de perturbación, cambiándola a 0 [V].

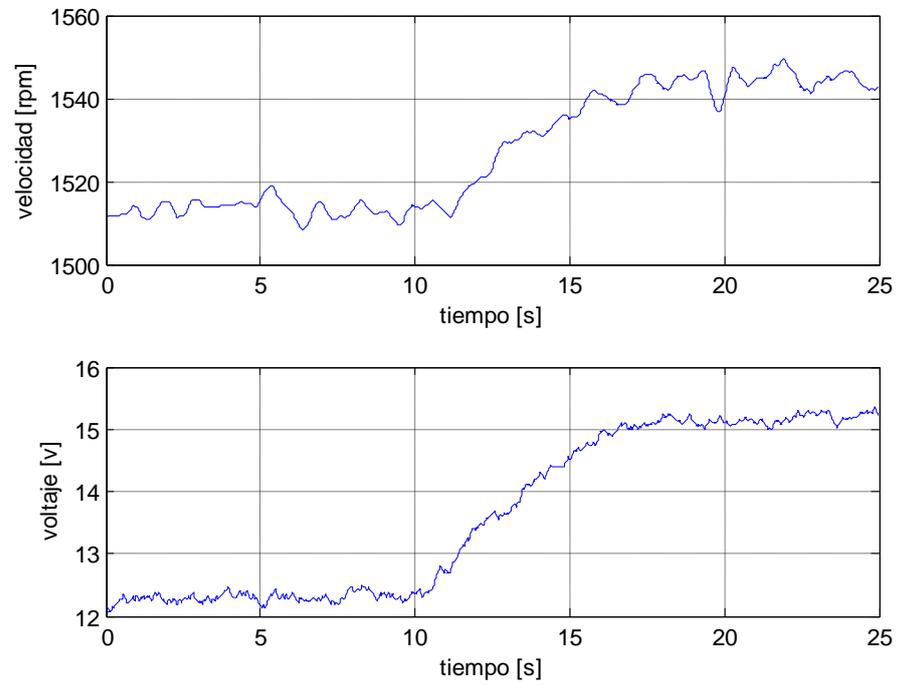


Figura 5.9 Respuesta de la velocidad y del voltaje debido a perturbación

De la figura 5.9 se deduce que:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta Rl} = \frac{25}{-3.5} = 7.14 \quad y \quad \frac{\Delta v}{\Delta Rl} = \frac{3}{-3.5} = 0.857$$

Ecuación 5.5 Variación de velocidad y de voltaje de salida con respecto a cambio en perturbación.

## 5.4 REPRESENTACIÓN DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA IDENTIFICADAS EN DIAGRAMA DE FLUJO DE SEÑAL.

El modelo de estado de grafo de flujo de señal se puede deducir fácilmente a partir de la función de transferencia del sistema. Sin embargo existe más de un conjunto alternativo de variables de estado y, por tanto, hay más de una forma posible para los modelos de estado de grafo de flujo de señal.

Para realizar la representación de la función de transferencia en diagrama de flujo de señal se parte de manera general escribiendo la función de transferencia como

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

Ecuación 5.6 Función de transferencia en forma general

Donde  $n \geq m$  y todos los coeficientes  $a$  y  $b$  son números reales. Si se multiplica el numerador y el denominador por  $s^{-n}$ , se obtiene:

$$G(s) = \frac{b_m s^{-(n-m)} + b_{m-1} s^{-(n-m+1)} + \dots + b_1 s^{-(n-1)} + b_0 s^{-n}}{1 + a_{n-1} s^{-1} + \dots + a_1 s^{-(n-1)} + a_0 s^{-n}}$$

Ecuación 5.7 Función de transferencia en forma general multiplicada por  $s^{(-n)}$

El conocimiento de la fórmula de Mason para la ganancia del grafo del flujo permite reconocer los factores usuales de realimentación en el numerador. La fórmula de Mason del grafo de flujo se escribe como.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\sum_k P_k \Delta_k}{\Delta}$$

Ecuación 5.8 Ecuación de Mason

Cuando todos los lazos de realimentación se tocan y todas las trayectorias de avance tocan los lazos de realimentación la ecuación 5.8 se reduce a

$$G(s) = \frac{\sum_k P_k \Delta_k}{1 - \sum_{q=1}^n L_q} = \frac{\text{suma de los factores de trayectoria de avance}}{1 - \text{suma de los factores de lazos de realimentacion}}$$

Ecuación 5.9 Ecuación de Mason simplificada

Existen varios grafos de flujo de señal que puede representar la función de transferencia, el modelo de estado de grafo de flujo de señal que se va a usar es la forma canónica de variable de fase.

Considerando la función de transferencia de cuarto orden como se muestra en la ecuación 5.10

$$G(s) = \frac{b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} = \frac{b_3s^{-1} + b_2s^{-2} + b_1s^{-3} + b_0s^{-4}}{1 + a_3s^{-1} + a_2s^{-2} + a_1s^{-3} + a_0s^{-4}}$$

Ecuación 5.10 Función de transferencia de cuarto orden

Los términos del numerador representan los factores de la trayectoria de avance en la fórmula de Mason para la ganancia de flujo de señal. Las trayectorias de avance tocaran todos los lazos de realimentación; en la figura 5.10 se muestra una representación adecuada del grafo de flujo de señal de la ecuación 5.10

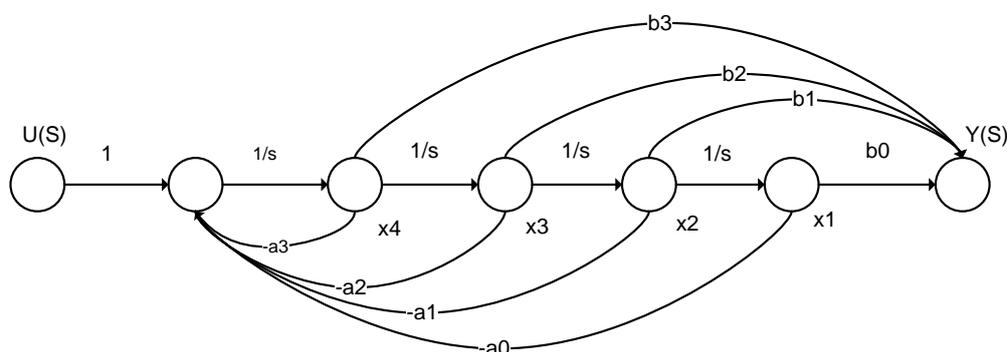


Figura 5.10 Función de transferencia de cuarto orden expresado en variables de fase.

Los factores de las trayectorias de avance son  $b_3/s$ ,  $b_2/s^2$ ,  $b_1/s^3$ , y  $b_0/s^4$ , como se requiere para proporcionar el numerador de la función de transferencia. Esta forma general de grafo de flujo de señal puede

representar la función de transferencia general de la ecuación 5.6 utilizando  $n$  lazos de realimentación que incluyan los coeficientes  $a_n$  y  $m$  factores de trayectoria directa que incluyan los coeficientes  $b_m$ . La forma general del modelo de estado de grafo de flujo de la figura 5.10 se denomina forma canónica de la variable de fase. [16]

#### 5.4.1 REPRESENTACIÓN EN VARIABLES DE FASE DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA VELOCIDAD $\omega$ VS VOLTAJE DEL VARIADOR DE FRECUENCIA $V_f$ .

Al desarrollar la ecuación 5.1 tenemos que:

$$\frac{\omega}{V_f} = \frac{K_1}{(s + p_1)(s + p_2)} = \frac{K_1}{s^2 + (p_1 + p_2)s + p_1p_2}$$

Dividiendo el numerador y el denominador para  $s^2$

$$\frac{\omega}{V_f} = \frac{K_1s^{-2}}{1 + (p_1 + p_2)s^{-1} + p_1p_2s^{-2}}$$

Ecuación 5.11 Función de transferencia velocidad vs voltaje variador de frecuencia.

En la figura 5.11 se muestra la representación de la función de transferencia en diagrama de flujo en la forma canónica de variable de fase.

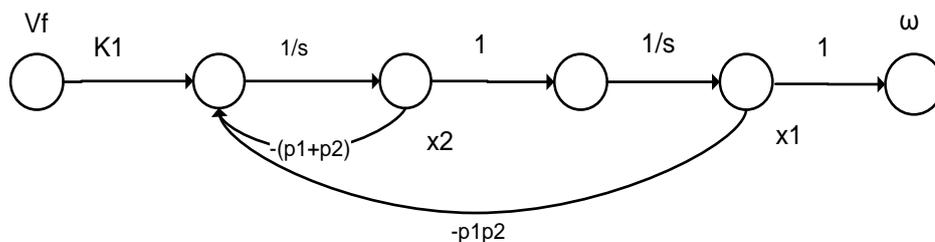


Figura 5.11 Representación de la ecuación 5.11 en variables de fase

Usando el diagrama de flujo de señal de la figura 5.11, se puede obtener el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el estado del modelo

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = -p_1 p_2 x_1 - (p_1 + p_2) x_2 + K_1 V_f$$

Ecuación 5.12 Ecuaciones diferenciales del diagrama de la figura 5.11.

Representando matricialmente la ecuación 5.11 se tiene

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -p_1 p_2 & -(p_1 + p_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_1 \end{bmatrix} V_f$$

Ecuación 5.13 Representación matricial de la ecuación 5.11

### 5.4.2 REPRESENTACIÓN EN VARIABLES DE FASE DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA VELOCIDAD $\omega$ VS VOLTAJE DE CAMPO DEL ALTERNADOR $V_{fg}$ .

Desarrollando la ecuación 5.2 tenemos lo siguiente

$$\frac{\omega}{V_{fg}} = \frac{K_2}{(s + p_3)(s + p_4)} = \frac{K_2}{s^2 + (p_3 + p_4)s + p_3p_4}$$

Dividiendo el numerador y el denominador para  $s^2$

$$\frac{\omega}{V_{fg}} = \frac{K_2 s^{-2}}{1 + (p_3 + p_4)s^{-1} + p_3p_4s^{-2}}$$

Ecuación 5.14 Función de transferencia velocidad vs voltaje de campo del alternador.

En la figura 5.12 se muestra la representación de la función de transferencia en diagrama de flujo en la forma canónica de variable de fase.

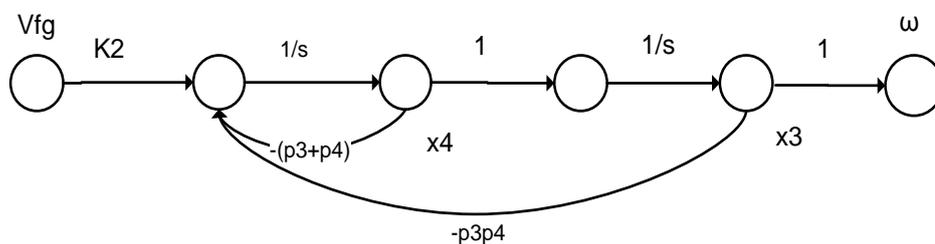


Figura 5.12 Representación de la ecuación 5.14 en variables de fase

Usando el diagrama de flujo de señal de la figura 5.12, se puede obtener el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el estado del modelo

$$\dot{x}_3 = x_4, \quad \dot{x}_4 = -p_3 p_4 x_4 - (p_3 + p_4)x_3 + K_2 V_{fg}$$

Ecuación 5.15 Ecuaciones diferenciales del diagrama de la figura 5.12.

Representando matricialmente la ecuación 5.15 se tiene

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -p_3 p_4 & -(p_3 + p_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_2 \end{bmatrix} V_{fg}$$

Ecuación 5.16 Representación matricial de la ecuación 5.15

#### 5.4.3 REPRESENTACIÓN EN VARIABLES DE FASE DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA VOLTAJE DE SALIDA $V_a$ VS VOLTAJE VARIADOR DE FRECUENCIA $V_f$ .

Desarrollando la ecuación 5.3 tenemos que

$$\frac{V_a}{V_f} = \frac{K_3}{(s + p_5)(s + p_6)} = \frac{K_3}{s^2 + (p_5 + p_6)s + p_5 p_6}$$

Dividiendo el numerador y el denominador para  $s^2$

$$\frac{V_a}{V_f} = \frac{K_3 s^{-2}}{1 + (p_5 + p_6)s^{-1} + p_5 p_6 s^{-2}}$$

Ecuación 5.17 Función de transferencia voltaje de salida vs voltaje del variador de frecuencia.

En la figura 5.13 se muestra la representación de la función de transferencia en diagrama de flujo en la forma canónica de variable de fase.

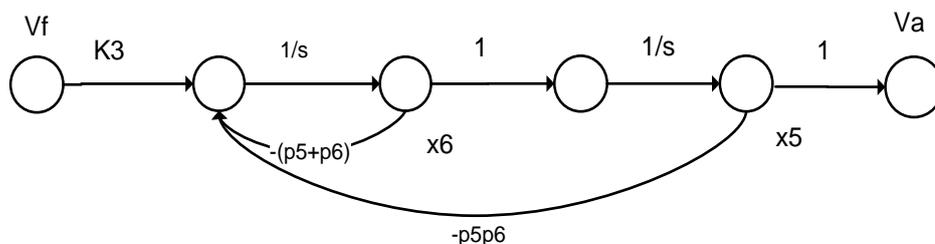


Figura 5.13 Representación de la ecuación 5.17 en variables de fase

Usando el diagrama de flujo de señal de la figura 5.13, se puede obtener el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el estado del modelo

$$\dot{x}_5 = x_6, \quad \dot{x}_6 = -p_5 p_6 x_5 - (p_5 + p_6)x_6 + K_3 V_f$$

Ecuación 5.18 Ecuaciones diferenciales del diagrama de la figura 5.13.

Representando matricialmente la ecuación 5.18 se tiene

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -p_5 p_6 & -(p_5 + p_6) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_3 \end{bmatrix} V_f$$

Ecuación 5.19 Representación matricial de la ecuación 5.18

#### 5.4.4 REPRESENTACIÓN EN VARIABLES DE FASE DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA VOLTAJE DE SALIDA $V_a$ VS VOLTAJE DE CAMPO DEL ALTERNADOR $V_{fg}$ .

Desarrollando la ecuación 5.4 tenemos que

$$\frac{V_a}{V_{fg}} = \frac{K_4}{(s + p_7)(s + p_8)} = \frac{K_4}{s^2 + (p_7 + p_8)s + p_7 p_8}$$

Dividiendo el numerador y el denominador para  $s^2$

$$\frac{V_a}{V_{fg}} = \frac{K_4 s^{-2}}{1 + (p_7 + p_8)s^{-1} + p_7 p_8 s^{-2}}$$

Ecuación 5.20 Función de transferencia voltaje de salida vs voltaje de campo del alternador

En la figura 5.14 se muestra la representación de la función de transferencia en diagrama de flujo en la forma canónica de variable de fase.

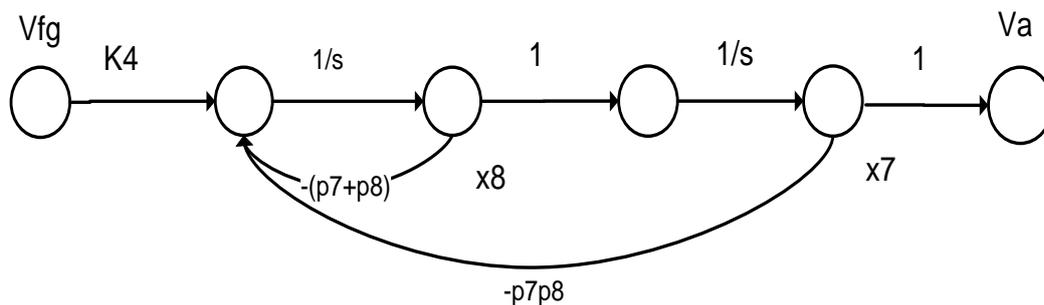


Figura 5.14 Representación de la ecuación 5.20 en variables de fase

Usando el diagrama de flujo de señal de la figura 5.14, se puede obtener el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el estado del modelo

$$\dot{x}_7 = x_8, \quad \dot{x}_8 = -p_7 p_8 x_7 - (p_7 + p_8) x_8 + K_4 V_{fg}$$

Ecuación 5.21 Ecuaciones diferenciales del diagrama de la figura 5.14.

Representando matricialmente la ecuación 5.21 se tiene.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -p_7 p_8 & -(p_7 + p_8) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_4 \end{bmatrix} V_{fg}$$

Ecuación 5.22 Representación matricial de la ecuación 5.21

## **5.5 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE EN VARIABLES DE ESTADO.**

La representación del sistema frecuencia-voltaje en variables de estado se puede resumir en tres pasos:

1. Representación del sistema en función de transferencia.
2. Representación del sistema en diagrama de flujo de señal a partir de las funciones de transferencia del sistema.
3. Representación del sistema en variables de estado por medio de las ecuaciones diferenciales obtenidas del diagrama de flujo de señal.

El sistema frecuencia-voltaje puede ser representado por medio de las funciones de transferencia identificadas tal como se muestra en la figura 5.15

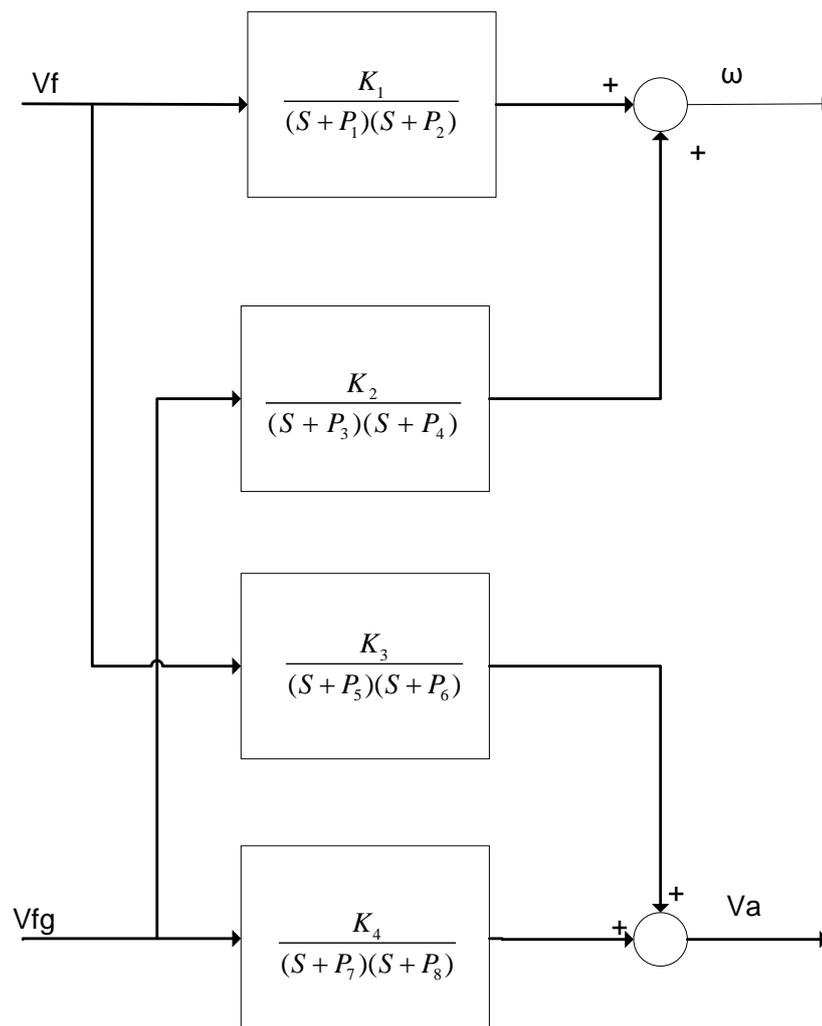


Figura 5.15 Representación del sistema frecuencia-voltaje en función de transferencia

Al conectar los diagramas de flujo de señal de las funciones de transferencias identificadas de manera idéntica como se muestra en la figura 5.15, obtenemos la representación del sistema-frecuencia voltaje en diagrama de flujo de señal tal como se muestra en la figura 5.16

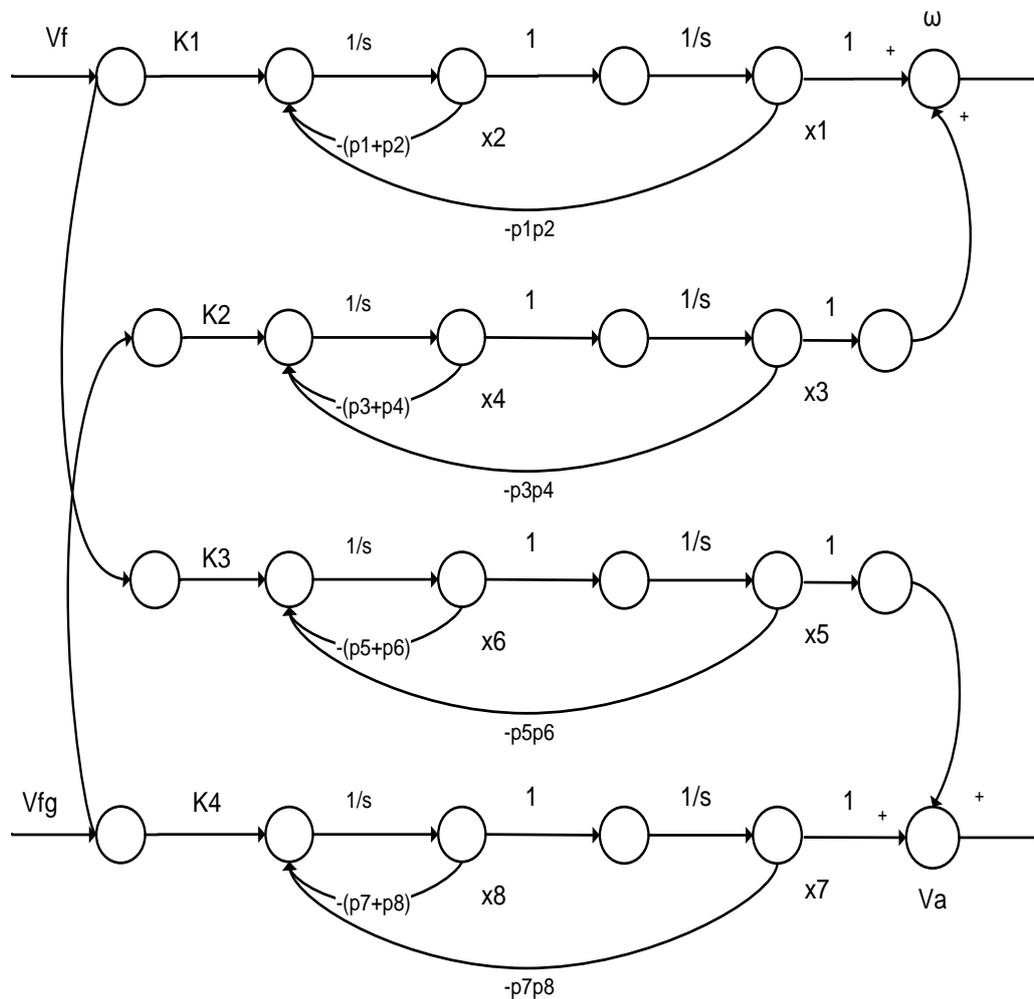


Figura 5.16 Representación del sistema frecuencia-voltaje en diagrama de flujo

Del diagrama de flujo de la figura 5.16 se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales o ecuaciones de estado.

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = -p_1 p_2 x_1 - (p_1 + p_2)x_2 + K_1 V_f$$

$$\dot{x}_3 = x_4, \quad \dot{x}_4 = -p_3 p_4 x_3 - (p_3 + p_4)x_4 + K_2 V_{fg}$$

$$\dot{x}_5 = x_6, \quad \dot{x}_6 = -p_5 p_6 x_5 - (p_5 + p_6)x_6 + K_3 V_f$$

$$\dot{x}_7 = x_8, \quad \dot{x}_8 = -p_7 p_8 x_7 - (p_7 + p_8)x_8 + K_4 V_{fg}$$

$$\omega = X_1 + X_3, \quad V_a = X_5 + X_7$$

Ecuación 5.23 Ecuaciones deferenciales del diagrama de la figura 5.16

El conjunto de ecuaciones diferenciales de la ecuación 5.23 puede escribirse de forma matricial como sigue:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -p_1 p_2 & -(p_1 + p_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -p_3 p_4 & -(p_3 + p_4) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -p_5 p_6 & -(p_5 + p_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -p_7 p_8 & -(p_7 + p_8) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_2 \\ 0 & 0 \\ K_3 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f(t) \\ V_{fg}(t) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \omega(t) \\ V_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.24 Representación matricial de las ecuaciones diferenciales

Analizando la forma matricial de la ecuación 5.24 el sistema tiene la forma de la ecuación de estados

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

Ecuación 5.25 Ecuación diferencial de estados

Comparando la ecuación 5.24 y 5.25. A es una matriz cuadrada de 8x8, B es una matriz de 2x8, x es la matriz de columnas formadas por las variables de estado denominado vector de estados de dimensión 8x1 y u es una matriz de 2x1.

Las salidas del sistema se relacionan con las variables de estado por la ecuación de salida

$$y(t) = Cx(t)$$

Ecuación 5.26 Ecuación de salida

Donde y es el conjunto de señales de salida expresado en forma de vector columna de 2x1. La representación en variables de estado del sistema consta de la ecuación diferencial de estados y la ecuación de salida.

Para verificar que la representación en variables de estado del sistema frecuencia-voltaje concuerda con la representación en función de transferencia se van a comparar ambas representaciones por medio de una simulación en el simulink de matlab como se muestra en la figura 5.17.

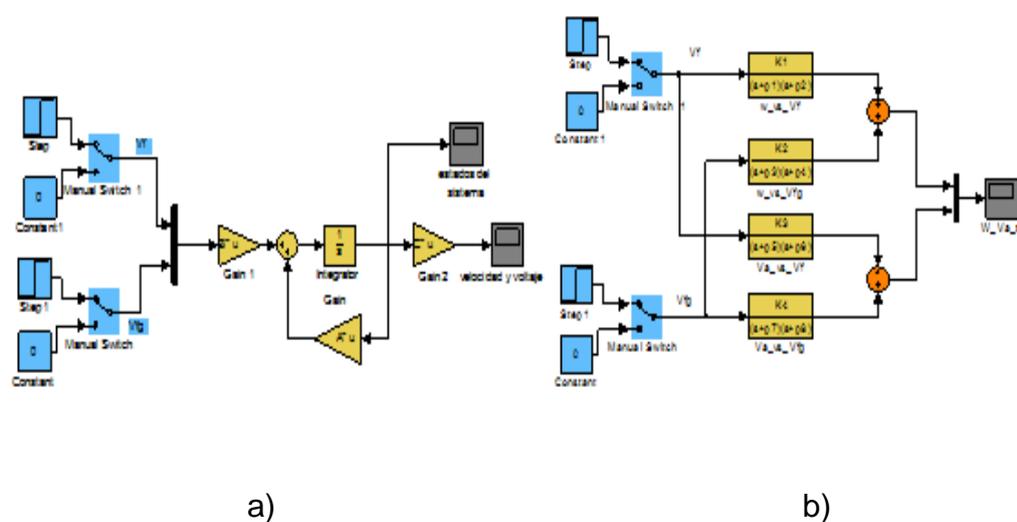


Figura 5.17 Simulación del sistema frecuencia-voltaje a) variable de estado b) función de transferencia

En la figura 5.18 se muestran las respuestas que se obtienen al ejecutar las simulaciones ante una entrada tipo escalón en la entrada del variador de frecuencia al primer segundo de la simulación y una entrada tipo escalón en el campo del alternador a los cinco segundos de la simulación. De la figura 5.18 se puede concluir que ambas simulaciones representan el mismo sistema.

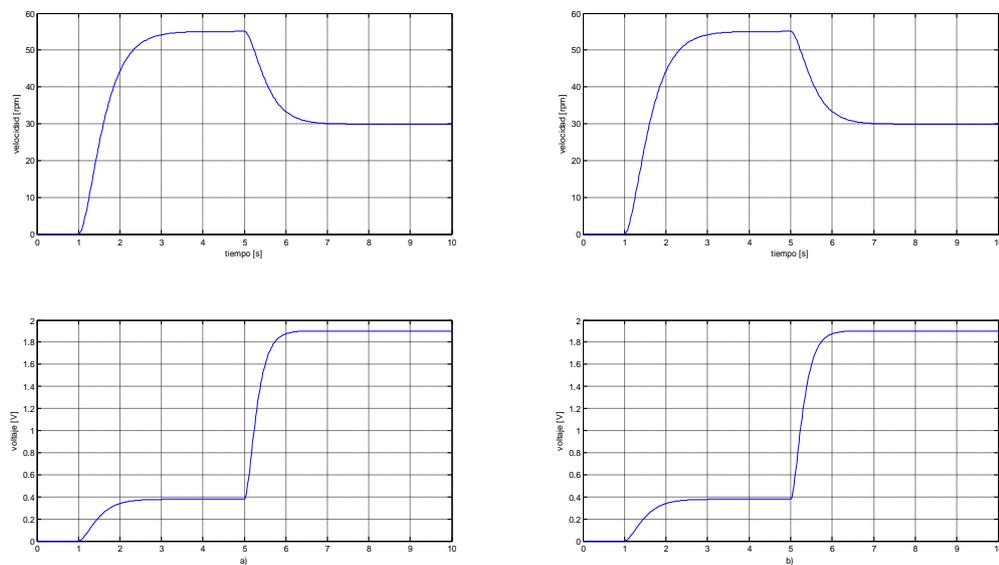


Figura 5.18 Respuestas de las simulaciones a) variable de estados b) función de transferencia

## 5.6 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES DEL ESTADO.

Para diseñar el controlador, primero se necesita plantear condiciones de funcionamiento deseadas del sistema frecuencia-voltaje, luego se necesita desacoplar el sistema de tal manera que el sistema frecuencia-voltaje se comporte como dos sistemas totalmente independientes, el sistema frecuencia y el sistema voltaje de salida. Por último se debe calcular el controlador para ambos sistemas y los observadores de estado para estimar los estados que no son medibles, para lo cual se utiliza el método de reubicación de polos del modelo interno y finalmente,

ajustarlo para compensar las diferencias entre lo estimado teóricamente y el comportamiento real.

## **5.7 ESPECIFICACIONES GENERALES DE FUNCIONAMIENTO**

A continuación se van a plantear las especificaciones del control en variables de estado para el sistema frecuencia-voltaje.

El error de estado estacionario deseado para las dos variables de salida es cero para entradas de prueba tipo escalón, que es alcanzable gracias a los algoritmos que integran el error actuante.

El control para la velocidad es realizada por medios mecánicos mientras que el control del voltaje de salida se la realiza por medios eléctricos, considerando que las constantes de tiempo mecánicas son mayores que las constantes de tiempo eléctricas se desea que el tiempo de estabilización para la velocidad sea no mayor a los cinco segundos y para el voltaje de salida sea menor de un segundo.

El sobrenivel porcentual esperado para ambas variables de salida sea menor al 5% porque muchas veces para poder acelerar la estabilización de la planta hay que exceder la referencia.

## 5.8 CONTROLADOR POR EL MÉTODO DEREUBICACIÓN DE POLOS DEL MODELO INTERNO.

Lo que se desea es diseñar un compensador que garantice que las salidas realicen el seguimiento de la señal de referencia o de perturbación con error cero. Al diseño de tal compensador se lo conoce con el nombre del modelo interno.

En la figura 5.19 se muestra el diagrama del modelo interno en donde se cierra el lazo de control dos veces, uno para las variables de estado y otro para regular la salida calculando el error actuante e integrando dicho error.[17]

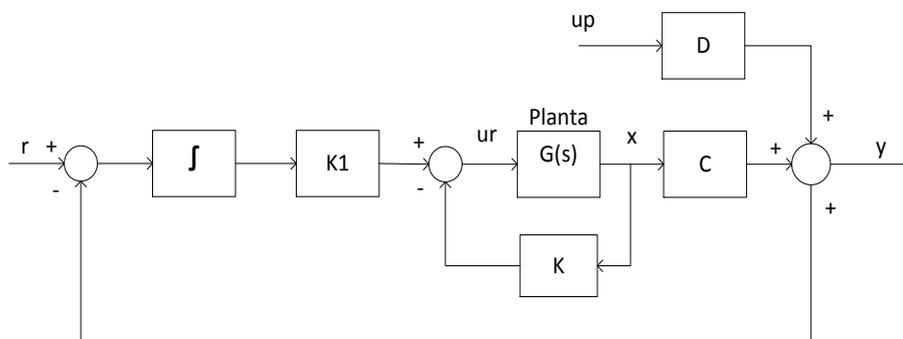


Figura 5.19 Diagrama del modelo interno

Para analizar el controlador, partimos de las ecuaciones originales del sistema en variables de estado

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_r(t)$$

Figura 5.20 Ecuación diferencial de estados

$$y(t) = Cx(t) + Du_p(t)$$

Figura 5.21 Ecuación de salida

Dónde:

A es la matriz del sistema

B es la Matriz de Entradas,

C es la Matriz de Salidas,

x es el Vector de estados,

$u_r$  es el Vector de Entradas que se utilizan en la realimentación del estado,

$u_p$  Es el vector de entradas que representa las perturbaciones externas,

y es el Vector de Salidas.

Se va a analizar el caso de un sistema tipo cero al que se le aplica una señal de prueba tipo escalón. Como se muestra en la figura 5.19, al retroalimentar el sistema para controlarlo, se genera la señal de error del sistema que se calcula con la ecuación 4.3[18]

$$e = r - y$$

Ecuación 5.27 Definición del error del sistema

Al derivar la ecuación 4.3 se tiene:

$$\dot{e} = \dot{r}(t) - \dot{y}(t)$$

Ecuación 5.28 Derivada del error del sistema

Recordando que la señal de perturbación  $u_p$  se mantiene constante.

Para un tiempo  $t > 0$

$$r = 1\mu(t); \quad \dot{r}(t > 0) = 0$$

$$\dot{y} = C\dot{x}(t)$$

Ecuación 5.29 Derivadas de  $r$ ,  $y$

---

18 Diseño de los sistemas de control en el dominio del tiempo, capítulo 8-notas de clases-Ing Juan del Pozo.

[http://www.jdelpozo.espol.edu.ec/web/Dropbox/Public/Control\\_Autom%20tico/ControlAutomaticoC8.pdf](http://www.jdelpozo.espol.edu.ec/web/Dropbox/Public/Control_Autom%20tico/ControlAutomaticoC8.pdf)

Evaluando en la ecuación 5.28

$$\dot{e} = -c\dot{x}$$

Ecuación 5.30 Simplificación de la derivada del error del sistema

Del diagrama del modelo interno se obtiene el valor de  $u_r$

$$u_r = K_1 \int_{0+}^t (r - y) d\tau - Kx$$

Ecuación 5.31 Valor de  $u_r$

Derivando la ecuación 5.31

$$\dot{u}_r = K_1(r - y) - k\dot{x}$$

Ecuación 5.32 Derivada de  $u$

Definiendo dos variables nuevas  $z$  y  $w$

$$z = \dot{x} ; w = \dot{u}_r$$

Al reemplazar las nuevas variables, se genera un nuevo sistema, en el que se ha aumentado una variable de estado.

$$\dot{y} = cz$$

$$\ddot{x} = A\dot{x} + B\dot{u}_r \rightarrow \dot{z} = Az + Bw$$

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} w$$

Ecuación 5.33 Ecuación matricial de estados en lazo cerrado inicial.

Al reemplazar  $w$  en la ecuación 5.33 se tiene.

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} 0 & C \\ 0 & A \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} [k_1 \quad k] \right\} \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} k_1 r$$

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C \\ -Bk_1 & A - Bk \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Bk_1 \end{bmatrix} r$$

Ecuación 5.34 Ecuación matricial de estados en lazo cerrado

Además, con este nuevo conjunto de variables de estado la salida “ $y$ ” es:

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.35 Ecuación de salida en lazo cerrado

Luego, a partir de las ecuaciones 5.33 a 5.35 podemos obtener las matrices de modelo interno

$$A_{mi} = \begin{bmatrix} 0 & C \\ 0 & A \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.36 Matriz de estado del modelo interno

$$B_{mi} = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.37 Matriz de entradas del modelo interno

$$C_{mi} = [1 \quad 0]$$

Ecuación 5.38 Matriz de salidas del modelo interno

En las matrices del Modelo Interno no se incluye la matriz que multiplica a la señal de referencia, porque como se puede observar en la Ecuación 5.34 no influye en la reubicación de los polos del sistema.

## 5.9 DESACOPLAMIENTO DEL SISTEMA FRECUENCIA –VOLTAJE

Cuando se realiza la reubicación de los polos del sistema frecuencia-voltaje no se puede determinar cómo se ve afectada la dinámica de cada salida en particular. La ventaja que se obtiene al desacoplar el sistema frecuencia-voltaje consiste en que se va a trabajar en dos sistemas totalmente independientes, el sistema frecuencia y el sistema voltaje, en los cuales se puede saber la dinámica de cada variable de salida al realizar la reubicación de los polos.

### 5.9.1 CÁLCULO DEL DESACOPLADOR

La forma más simple de representar al sistema frecuencia-voltaje es la que se muestra en la figura 5.22. Los bloques G representan los bloques de la ganancia dinámica obtenidos en la identificación del sistema, se puede observar claramente el acoplamiento que existe entre ambas entradas, una variación en cualesquiera de las dos entrada produce una variación en ambas salidas. [19]

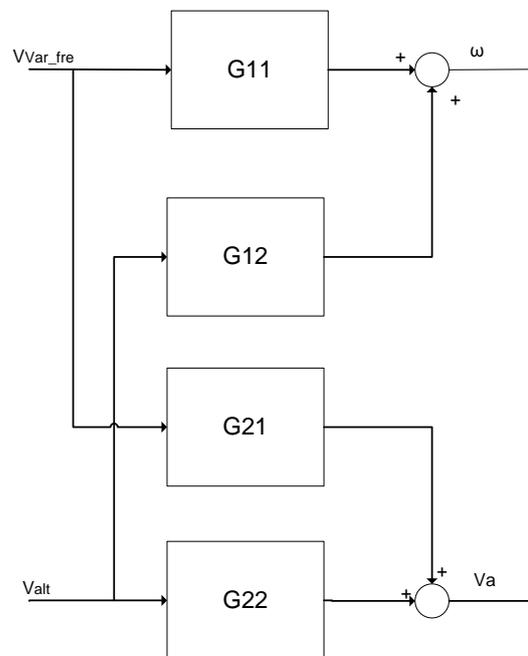


Figura 5.22 Representación del sistema frecuencia-voltaje en diagrama de bloques.

Dónde:

$$G_{11} = \frac{\omega}{V_{var\_fre}} = \frac{K_{11}}{(s/p_1 + 1)(s/p_2 + 1)}, G_{12} = \frac{\omega}{V_{alt}}$$

$$= \frac{K_{12}}{(s/p_3 + 1)(s/p_4 + 1)},$$

$$G_{21} = \frac{V_a}{V_{var\_fre}} = \frac{K_{21}}{(s/p_5 + 1)(s/p_6 + 1)}, G_{22} = \frac{V_a}{V_{alt}} = \frac{K_{22}}{(s/p_7 + 1)(s/p_8 + 1)}$$

Ecuación 5.39 Funciones de transferencia del sistema frecuencia-voltaje

Los valores  $K_{11}$ ,  $K_{12}$ ,  $K_{21}$ ,  $K_{22}$  de la ecuación 5.39 se denominan ganancias de estado estacionario de circuito abierto.

Para determinar los pares de variables manipuladas y controladas, se crea la matriz de ganancias relativas  $\mu$  que tiene la forma de la ecuación 5.40

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} \\ \mu_{21} & \mu_{22} \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.40 Matriz de ganancias relativas para un sistema de dos entradas y dos salidas

Los valores de cada uno de los elementos de la matriz de ganancias relativas están expresados en la ecuación 5.41

$$\mu_{11} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}, \quad \mu_{12} = \frac{-K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

$$\mu_{21} = \frac{-K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}, \quad \mu_{22} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

Ecuación 5.41 Matriz de ganancias relativas para un sistema de dos entradas y dos salidas.

Realizando los cálculos, la matriz de ganancias relativas para el sistema frecuencia-voltaje se la expresa en la ecuación 5.42.

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.1 & 0.9 \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.42 Matriz de ganancias relativas del sistema frecuencia-voltaje.

La matriz de ganancia relativa nos permite seleccionar los pares de variable manipula-controlada [20], los valores de la diagonal principal de la matriz de ganancia relativa son cercanos a uno, por lo tanto las variables manipuladas-controladas son: el voltaje del variador de frecuencia  $vvar\_fre$  con la velocidad  $\omega$  y el voltaje del alternador  $valt$  con el voltaje de salida  $va$ . El hecho de que los valores de la diagonal principal de la matriz de ganancia relativa no sea exactamente uno,

indica que existe un acoplamiento o incidencia entre ambos pares de variable manipulada-controlada.

El objetivo es desacoplar ambos pares de variable manipulada-controlada, de tal manera que el sistema frecuencia-voltaje se divida en dos sistemas totalmente independientes, el sistema frecuencia y el sistema voltaje de salida. El compensador que realiza la tarea de desacoplamiento, se conoce con el nombre de desacoplador y su diagrama se muestra en la figura 5.23.

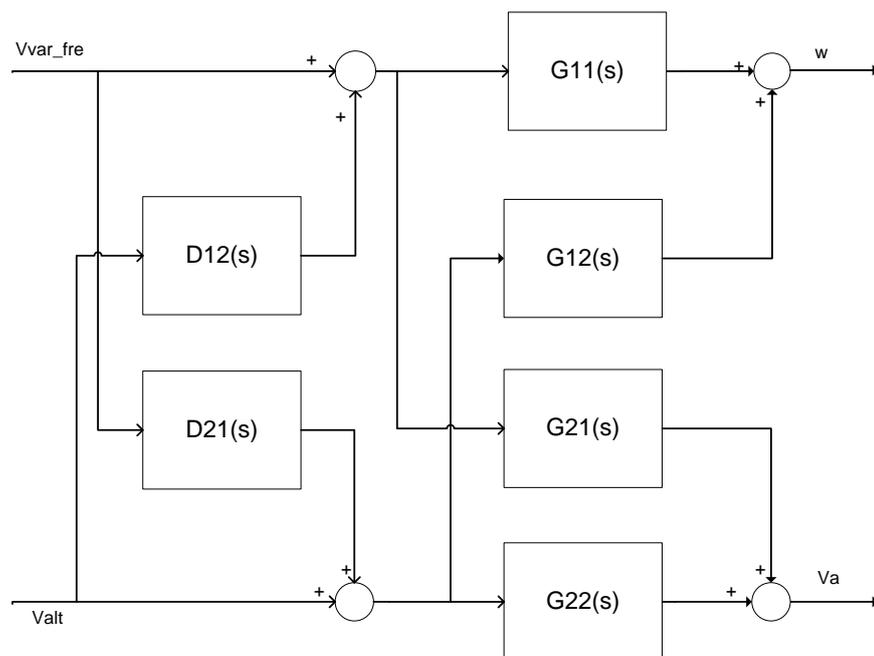


Figura 5.23 Diagrama de bloques del desacoplador.

Se pretende que D12 cancele el efecto que se produce en  $\omega$  cuando se produce un cambio en  $V_{alt}$  y que D21 cancele el efecto que se produce en  $V_a$  cuando se produce un cambio en  $V_{var\_fre}$ . Del diagrama de bloques de la figura 5.23 se obtienen las siguientes ecuaciones. [21]

$$\frac{\omega(s)}{v_{alt}(s)} = D_{12}(s)G_{11}(s) + G_{12}(s) = 0$$

$$\frac{v_a(s)}{v_{var\_fre}} = D_{21}(s)G_{22}(s) + G_{21}(s) = 0$$

Ecuación 5.43 Ecuaciones del desacoplador.

Resolviendo el sistema de ecuaciones de la ecuación 5.43, determinamos las funciones de transferencias de los desacopladores de D12 y D21.

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} = -\frac{K_2(s + p_1)(s + p_2)}{K_1(s + p_3)(s + p_4)} = \frac{0.1878(s + 3)(s + 3.035)}{(s + 4.066)(s + 3.069)}$$

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} = -\frac{K_3(s + p_7)(s + p_8)}{K_4(s + p_5)(s + p_6)} = -\frac{0.3452(s + 5.976)(s + 5.975)}{(s + 4.237)(s + 3.515)}$$

Ecuación 5.44 Funciones de transferencia del desacoplador.

Para demostrar que las funciones de transferencia del desacoplador funcionan, se realiza una simulación en SIMULINK de Matlab del sistema frecuencia-voltaje desacoplado.

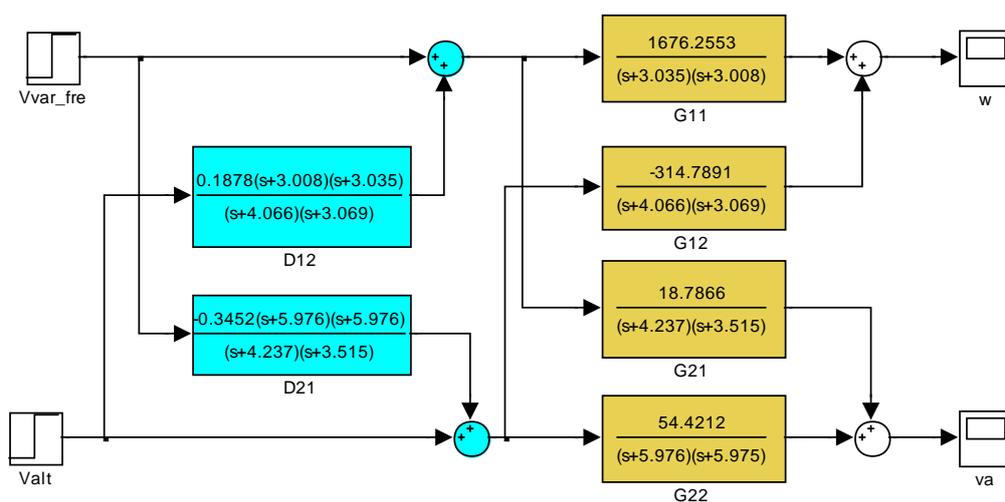


Figura 5.24 Simulación del sistema frecuencia-voltaje desacoplado

El resultado de la simulación se muestran en la figura 5.25, en esta figura se muestran dos gráficos, el primer gráfico corresponde a la velocidad y el segundo al voltaje de salida. Viendo simultáneamente ambos gráficos se puede observar que al segundo de la simulación se

produce un cambio en  $V_{var\_fre}$  que solo afecta la velocidad  $\omega$  mientras que el voltaje de salida  $v_a$  no se ve afectado, también se puede observar que a los cinco segundos de la simulación se produce un cambio en  $V_{alt}$ , provocando una variación en el voltaje de salida  $v_a$ , manteniendo constante la velocidad  $\omega$ , esto demuestra que el sistema está desacoplado.

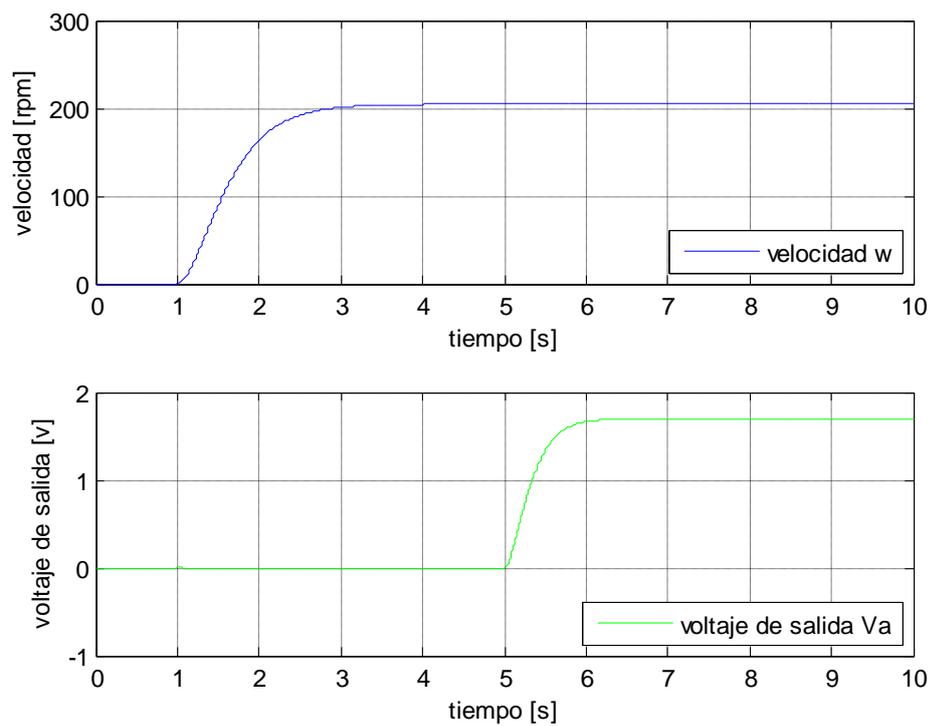


Figura 5.25 Gráficas del sistema desacoplado

## 5.10 DISEÑO DEL CONTROLADOR

En una central eléctrica el tiempo de respuesta depende del tipo de central. Por ejemplo, en las turbinas de una central hidroeléctrica se debe considerar el efecto de:

- La inercia del agua que provoca retardos en los cambios en el flujo de agua ante cambios en la apertura de los distribuidores o válvulas.
- La elasticidad de las paredes de la tubería de presión que provoca ondas viajeras de presión y flujo en la tubería fenómeno conocido como golpe de ariete.

Como consecuencia la respuesta de una central hidroeléctrica ante cambios en la frecuencia es relativamente lenta. En cambio la respuesta de las centrales térmicas ante cambios de frecuencia es más rápida porque no presenta esa particularidad provocada por la inercia del agua en las centrales hidroeléctricas. [22]

En el sistema frecuencia-voltaje, por tratarse de un modelo de una central eléctrica, se puede ajustar el tiempo de respuestas, así como

---

22 Tomado de sistemas de regulación de velocidad en línea:  
<http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/826/32/Regulaci%C3%B3nVelicidad%201.pdf>

también su comportamiento en estado transitorio, de tal manera que puede representar los diferentes tipos de centrales eléctricas.

Para realizar el diseño del controlador primero se debe comprobar que el sistema sea controlable y observable. Partiendo del hecho que el sistema frecuencia-voltaje esta desacoplado, se van a desarrollar dos controladores el primero para controlar el sistema frecuencia y el segundo para controlar el sistema voltaje de salida, previo al desarrollo del controlador se debe determinar que ambos sistemas sean controlables y observables.

#### **5.10.1 DETERMINACIÓN DE LA OBSERVABILIDAD DEL SISTEMA.**

Un sistema es completamente observable si y solo si existe un tiempo finito  $T$  de forma que el estado inicial  $x(0)$  se pueda determinar a partir de la observación de la historia  $y(t)$  dado el control  $u(t)$ . [23]

El sistema es completamente observable cuando el rango de la matriz observabilidad  $P_0$  es igual a la dimensión de la matriz  $A$ . [24]

---

23Observabilidad: Bishop, Robert; Dorf, Richard – Sistemas de Control Moderno – Pearson Prentice Hall – 663p

24Observabilidad: KatsuhikoOgata– Ingeniería de Control Moderna– Pearson Prentice Hall – 682p

$$P_0 = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.45 Matriz observabilidad

Para el sistema frecuencia, la representación del sistema en variables de estado está dada por las siguientes ecuaciones.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -9.12928 & -6.043 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1676.25 \end{bmatrix} V_f$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.46 Ecuaciones de estado para el sistema frecuencia

La matriz observabilidad del sistema frecuencia se la representa en la ecuación 5.47.

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.47 Matriz observabilidad del sistema frecuencia

El rango de  $P_0$  se lo obtiene directamente del Matlab por medio de la instrucción `Rank`, que determina el número de vectores linealmente independientes de  $P_0$ .

$$\text{rank}(P_0) = 2$$

El rango de la matriz  $P_0$  es 2, por lo tanto el sistema frecuencia es observable.

Para el sistema voltaje de salida, la representación del sistema en variables de estado está dada por las siguientes ecuaciones.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -35.64 & -11.94 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 54.42 \end{bmatrix} V_f$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.48 Ecuaciones de estado para el sistema voltaje de salida

La matriz observabilidad para el sistema voltaje de salida se la representa en la ecuación 5.49

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.49 Matriz observabilidad para el sistema voltaje de salida

El rango de la matriz  $P_0$  es 2, por lo tanto el sistema voltaje de salida es observable.

$$\text{rank}(P_0) = 2$$

### 5.10.2 DETERMINACIÓN DE LA CONTROLABILIDAD DEL SISTEMA.

Un sistema es completamente controlable si existe un control sin restricción  $u(t)$  que puede llevar cualquier estado inicial  $x(t_0)$  a cualquier otro estado deseado  $x(t)$  en un tiempo finito,  $t_0 \leq t \leq T$  [25].

La matriz de controlabilidad  $P_c$  se escribe en términos de  $A$  y  $B$  como se muestra en la ecuación 5.50

$$P_c = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]$$

Ecuación 5.50 Matriz controlabilidad

El sistema es controlable cuando el rango de la matriz  $P_c$  es igual a la dimensión de la matriz  $A$  [26].

---

25Controlabilidad: Bishop, Robert; Dorf, Richard – Sistemas de Control Moderno – Pearson Prentice Hall – 660p

26Controlabilidad: KatsuhikoOgata– Ingeniería de Control Moderna 5 ed– Pearson Prentice Hall – 676p

La matriz controlabilidad para el sistema frecuencia se la representa en la ecuación 5.51.

$$P_c = \begin{bmatrix} 0 & 1676.25 \\ 1676.25 & -10130 \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.51 Matriz controlabilidad para el sistema frecuencia

El rango de  $P_c$  se lo obtiene directamente del Matlab por medio de la instrucción `Rank`, que determina el número de vectores linealmente independientes de  $P_c$ .

$$\text{rank}(P_c) = 2$$

El rango de la matriz  $P_c$  es 2, por lo tanto el sistema frecuencia es controlable.

La matriz controlabilidad para el sistema voltaje de salida se la representa en la ecuación 5.52.

$$P_c = \begin{bmatrix} 0 & 54.42 \\ 54.42 & -649.77 \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.52 Matriz controlabilidad para el sistema voltaje de salida

El rango de la matriz controlabilidad para el sistema voltaje de salida es 2 por lo tanto es controlable.

$$\text{rank}(P_c) = 2$$

### 5.10.3 DESARROLLO DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR

En total se desarrollan dos controladores, el primero para el sistema frecuencia y el segundo para el sistema voltaje de salida.

El diseño del controlador consiste en determinar los valores  $K_1$  y  $K$  del diagrama del modelo interno de la figura 5.19, para determinar tales valores se utiliza la instrucción **place** de Matlab, esta instrucción genera los valores  $K_1$  y  $K$  en una misma matriz, para generar estos valores necesita el ingreso de la matriz de estado  $A$ ,  $B$  y los valores propios de  $A-BK$  que son los valores donde se desea reubicar los polos del sistema, estos valores son ingresados por medio del vector  $P$ , la forma de escribir la instrucción place en Matlab es como sigue.[27]

$$K=\text{place}(A,B,P)$$

---

27 Tomado del help de Matlab.

Se desea que ambos sistemas tengan un comportamiento de segundo orden en este caso sub-amortiguado, un sistema de segundo orden es descrito por la ecuación 5.53.

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Ecuación 5.53 Ecuación de un sistema de segundo orden

De tal manera que las expresiones para el tiempo de estabilización y el sobrenivel están calculadas en base a la figura 5.26.[28]

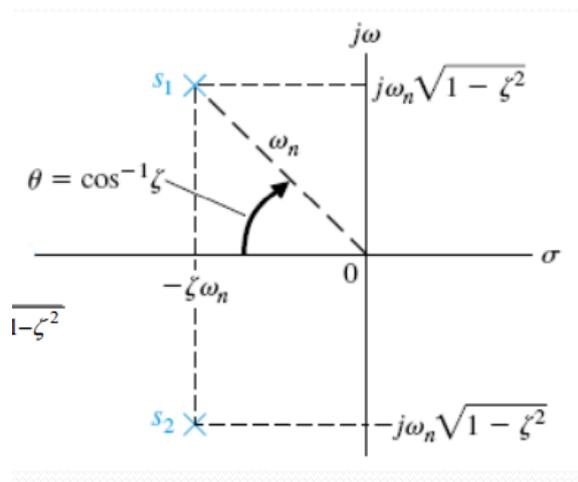


Figura 5.26 Ubicación de polo complejos conjugados en el plano complejo s para un sistema de segundo orden

De tal forma que el tiempo de estabilización  $t_s$  y el sobrenivel porcentual  $S_p$  para un sistema de segundo orden están dados por las siguientes expresiones

$$t_s = \frac{4}{\delta\omega_n}$$

Ecuación 5.54 tiempo de estabilización

$$S_p = 100e^{-\pi/\tan\theta}$$

Ecuación 5.55 Sobrenivel porcentual

#### 5.10.4 DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA EL SISTEMA FRECUENCIA.

La variable a controlar en esta parte es la frecuencia generada del sistema, la cual está directamente relacionada con la velocidad síncrona del alternador,[29] por lo tanto, por la relación que existe entre la velocidad y la frecuencia generada se puede realizar el control de la frecuencia por medio de la velocidad que es una de las variables censadas.

---

29 Consideraciones generales de la maquina síncrona: Michael Liwschitz-Garik, Clyde C. Whipple- Maquinas de corriente alterna- 351 p

$$\omega = \frac{120 \times f}{p} \rightarrow f = \frac{p \times \omega}{120} = \frac{\omega}{10}$$

Ecuación 5.56 Relación entre la frecuencia y la velocidad.

Dónde:

F es La frecuencia,  $\omega$  es la velocidad síncrona del alternador, y p el número de polos del alternador.

Considerando que el control de la frecuencia o velocidad se la realiza por medios mecánicos, se desea que el sistema frecuencia posea un tiempo de estabilización de 1 segundo y un sobrenivel porcentual menor o igual al 5% por lo tanto la ubicación de los polos estará dada por

$$\delta\omega_n = \frac{4}{1} = 4$$

Para que  $\Theta$  sea igual a  $45^\circ$  la parte imaginaria tiene que ser igual a  $\delta\omega_n$ .

$$S_p = 100e^{-\pi/\tan 45} = 4.32\%$$

En total hay que reubicar tres polos, para que exista dominancia de segundo orden, se recomienda que el tercer polo debe ser ubicado de tal manera que se encuentre alejado diez veces la parte real de los

polos dominantes[30], por lo tanto la posición de los polos es la siguiente:

$$p_{11} = [-4 - 4i \quad -4 + 4i \quad -20]$$

Ecuación 5.57 Nuevos polos del sistema frecuencia

Para determinar el controlador se requiere determinar las matrices de modelo interno, las cuales se obtienen de las ecuaciones de estado del sistema frecuencia.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -9.12928 & -6.043 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1676.25 \end{bmatrix} V_f$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Las matrices de modelo interno son las siguientes.

$$A_{mi11} = \begin{bmatrix} 0 & C_{11} \\ 0 & A_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -9.12928 & -6.043 \end{bmatrix}$$

$$B_{mi11} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1676.25 \end{bmatrix}$$

$$C_{mi11} = [1 \quad 0]$$

Ecuación 5.58 Matrices de modelo interno del sistema frecuencia

La matriz de realimentación de estado es obtenido a través de la instrucción place de Matlab

$$K_{c11} = \text{place}(A_{mi11}, B_{mi11}, p_{11})$$

El valor de la matriz  $K_{c11}$  que se obtiene del Matlab es la siguiente.

$$K_{c11} = [0.1909 \quad 12 \quad 103]$$

Ecuación 5.59 Matriz de realimentación de estados para el sistema frecuencia

De donde se obtiene  $K_{c11\_1}$  y  $K_{c11\_2}$  que representan el valor  $K_1$  y  $K$  respectivamente de la figura 5.19.

$$K_{c11\_1} = [0.1909]$$

$$K_{c11\_2} = [12 \quad 103]$$

### 5.10.5 DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA EL SISTEMA VOLTAJE DE SALIDA.

El control del voltaje de salida se lo realiza por medios eléctricos, esto hace que responda en forma más rápida, por lo tanto se puede ser más exigente y ajustar el controlador de tal manera que posea un tiempo de estabilización de 0.5 segundos y un sobrenivel menor o igual al 5%.

$$\delta\omega_n = \frac{4}{0.5} = 8$$

Para que  $\Theta$  sea igual a  $45^\circ$  la parte imaginaria tiene que ser igual a  $\delta\omega_n$ .

$$S_p = 100e^{-\pi/\tan 45} = 4.32\%$$

En total hay que reubicar tres polos, para que exista dominancia de segundo orden se recomienda que el tercer polo debe ser ubicado de tal manera que se encuentre alejado diez veces la parte real de los polos dominantes, por lo tanto la posición de los polos es la siguiente.

[31]

$$p_{22} = [-8 - 8i \quad -8 + 8i \quad -40]$$

Ecuación 5.60 Nuevos polos del sistema voltaje de salida

Para hallar el controlador se requiere determinar las matrices de modelo interno, las cuales se obtienen de las ecuaciones de estado del sistema voltaje de salida.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -35.64 & -11.94 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 54.42 \end{bmatrix} V_f$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \end{bmatrix}$$

Las matrices de modelo interno son las siguientes:

$$A_{mi22} = \begin{bmatrix} 0 & C_{22} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -35.64 & -11.94 \end{bmatrix}$$

$$B_{mi22} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 54.42 \end{bmatrix}$$

$$C_{mi22} = [1 \quad 0]$$

Ecuación 5.61 Matrices de modelo interno del sistema voltaje de salida

La matriz de realimentación de estado es obtenido a través de la instrucción place de Matlab

$$K_{c22} = \text{place}(A_{mi22}, B_{mi22}, p_{22})$$

El valor de la matriz  $K_{c22}$  que se obtiene del Matlab es la siguiente.

$$K_{c22} = [23.5208 \quad 14.06 \quad 252.3591]$$

Ecuación 5.62 Matriz de realimentación de estados para el sistema frecuencia

De donde se obtiene  $K_{c22\_1}$  y  $K_{c22\_2}$  que representan el valor  $K_1$  y  $K_2$  respectivamente de la figura 4.1 para el control del voltaje de salida.

$$K_{c22\_1} = [23.5208]$$

$$K_{c22\_2} = [14.06 \quad 252.3591]$$

### 5.11 DISEÑO DEL OBSERVADOR.

Las variables de estado sistema frecuencia-voltaje no pueden medirse directamente. Para casos como este, las variables de estado que se desean conocer han de ser calculados a partir de la evolución de las señales conocidas del sistema, que son sus salidas y sus entradas.[32]

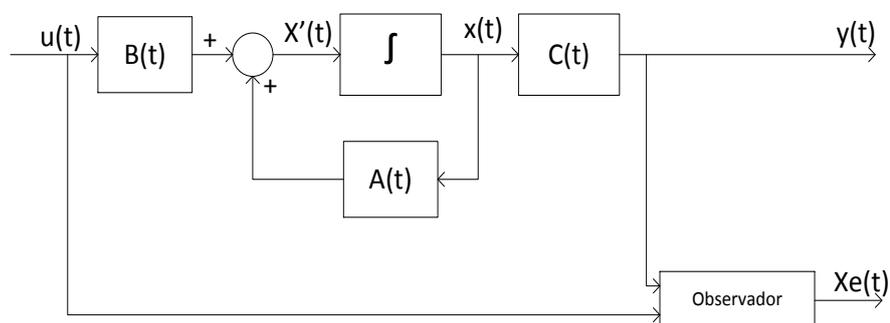


Figura 5.27 Concepto del observador

El cálculo de las variables de estado del sistema se realiza en el sistema denominado observador, cuyo esquema se muestra en la figura 5.27, que debe ser capaz de estimar los valores de las variables de estado del sistema en todo momento.

Para obtener de forma continua la evolución de las variables de estado del sistema en cada instante, se implementa un sistema dinámico que tiene como entradas las entradas y salidas del sistema, y que responde a las condiciones enunciadas por el siguiente teorema:

Dado un sistema lineal, invariante y observable:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

Se dice que el sistema definido por las ecuaciones 5.63 es un observador del anterior, si verifica las dos condiciones siguientes:

$$\dot{x}_e(t) = Fx_e(t) + Gu(t) + Hy(t)$$

Ecuación 5.63 Ecuación del observador

1. Si los estados de ambos sistemas coinciden en un instante  $t_0$ ,  $x_e(t_0) = x(t_0)$ , entonces los estados coinciden para todo instante posterior  $x_e(t) = x(t)$ , para cualquier entrada  $u(t)$  aplicada sobre el sistema.
2.  $x_e(t)$  debe tender asintóticamente al estado  $x(t)$ , para cualquier entrada  $u(t)$  y para cualesquiera estados iniciales  $x_e(t_0)$  y  $x(t_0)$ .

Estas dos condiciones imponen diversas restricciones a las matrices del observador. Si se forma la diferencia entre la evolución del estado del observador y del sistema:

$$\dot{x}_e(t) - \dot{x}(t) = Fx_e(t) - Ax(t) + (G - B)u(t) + HC(t)$$

Ecuación 5.64 Diferencia entre los estados del observador y del sistema

Se deduce que:

Por la primera condición, ante cualquier entrada, los estados deben coincidir en cualquier instante. Para que la entrada no influya en la diferencia entre ambos se debe cumplir.

$$G = B$$

Ecuación 5.65 Valor de G

Al reemplazar en la ecuación 5.64

$$\dot{x}_e(t) - \dot{x}(t) = Fx_e(t) - Ax(t) + HC(t)$$

Ecuación 5.66 Diferencia entre los estados del observador y del sistema

En la ecuación 5.66, para que los estados coincidan en todo instante se debe cumplir:

$$F = A - HC$$

Ecuación 5.67 Valor de F

Al reemplazar F en la ecuación 5.66

$$\dot{x}_e(t) - \dot{x}(t) = (A - HC)(x_e(t) - x(t))$$

Ecuación 5.68 Diferencia entre los estados del observador y del sistema simplificada

De la ecuación 5.68 se puede observar que, la dinámica de la diferencia entre las variables estimadas y las variables de estado viene gobernada por la matriz A-HC.

Si los estados iniciales no coinciden,  $x_{e0} \neq x_0$ , el estado estimado debe tender asintóticamente al estado del sistema, por lo que los valores propios de la matriz A-HC deben estar en el semiplano negativo.

En la práctica se necesita que la dinámica del observador dado por F sea más rápida que la del sistema dado por A, para que el observador estime las variables de estado más deprisa que la variación de estos y, por tanto, puedan ser utilizados de forma eficaz como una buena

estimación de las variables de estado en la realimentación del estado del sistema.

Esto se consigue si la parte de los valores propios de la matriz  $A-HC$  es significativamente menor que la de los valores propio de la matriz  $A$ . [33]

La representación gráfica del sistema con observador se muestra en la figura 5.28

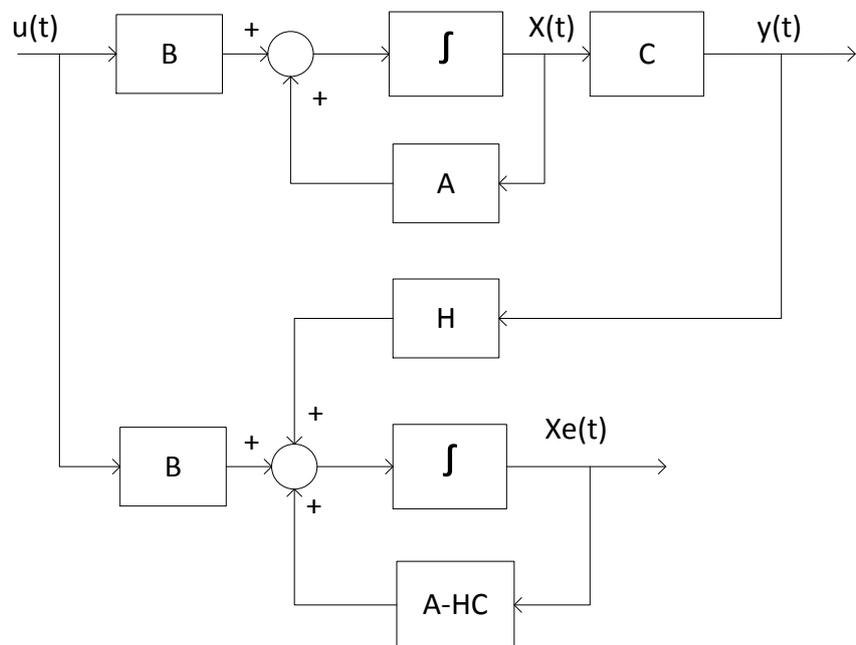


Figura 5.28 Esquema del sistema con observador

### 5.11.1 CÁLCULO DEL OBSERVADOR PARA ESTIMAR LOS ESTADOS.

En total existen cuatro estados, dos para el sistema frecuencia, y dos para el sistema voltaje de salida, de los cuales ninguno es medido o sentido, todos son estados internos del sistema, por lo tanto se necesita desarrollar dos observadores, uno para cada sistema.

### 5.11.2 CÁLCULO DEL OBSERVADOR PARA EL SISTEMA FRECUENCIA

Para estimar los estados del sistema frecuencia necesitamos determinar el valor de la matriz de realimentación H de la figura 5.28, para obtenerla utilizamos las transpuestas de las matrices  $A_{11}$  y  $C_{11}$  de la representación matricial de estados del sistema frecuencia.

$$A_{11}' = \begin{bmatrix} 0 & -9.12928 \\ 1 & -6.043 \end{bmatrix}$$

$$C_{11}' = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Otra información adicional que se requiere, tiene que ver con la ubicación de los nuevos polos del observador, como se mencionó anteriormente esta tiene que ser más rápida que la del sistema dado por  $A_{11}$ , por lo tanto los nuevos polos del sistema observador están dados por el vector  $p_{011}$ .

$$p_{o11} = [-12 \quad -14]$$

Ecuación 5.69 Ubicación de los polos del observador del sistema frecuencia

Con esta información se utiliza la instrucción `place` para determinar el valor de la matriz  $H_{11}$ .

$$H_{11} = \text{place}(A'_{11}, B'_{11}, p_{o11})$$

La matriz  $H$  de la figura 5.28 representada por  $H_{11}$ , que se obtiene al ejecutar esta instrucción en Matlab es la siguiente

$$H_{11} = \begin{bmatrix} 0.0233 \\ 0.0119 \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.70 Vector de realimentación del observador del sistema frecuencia

Una manera de demostrar que los nuevos polos del observador están dados por el vector  $p$ , es determinando los valores propios de  $F$ , esto se lo puede realizar en Matlab por medio de la instrucción **eig**.

$$\text{eig}(F) = p_{o11}$$

Para demostrar que el observador calculado estima los estados del sistema, se procede a realizar una simulación en el Simulink de Matlab, donde se somete al sistema a prueba pormedio de una entrada tipo escalon, en la figura 5.29. se muestra el diagrama de la simulación, donde los bloques de color amarillo representan al sistema frecuencia y los bloques de color naranja al observador.

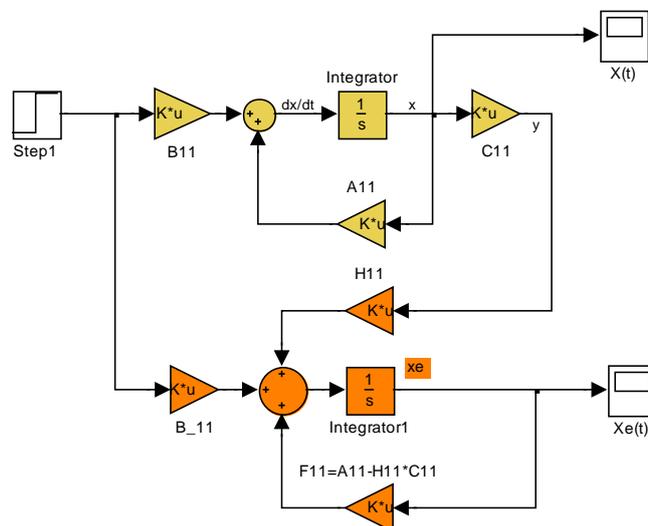


Figura 5.29 Observador del sistema frecuencia

En la figura 5.30 se muestra el resultado obtenido de la simulación, en esta figura se puede apreciar que los estados  $x_1$  y  $x_2$  estimados son iguales a los originales.

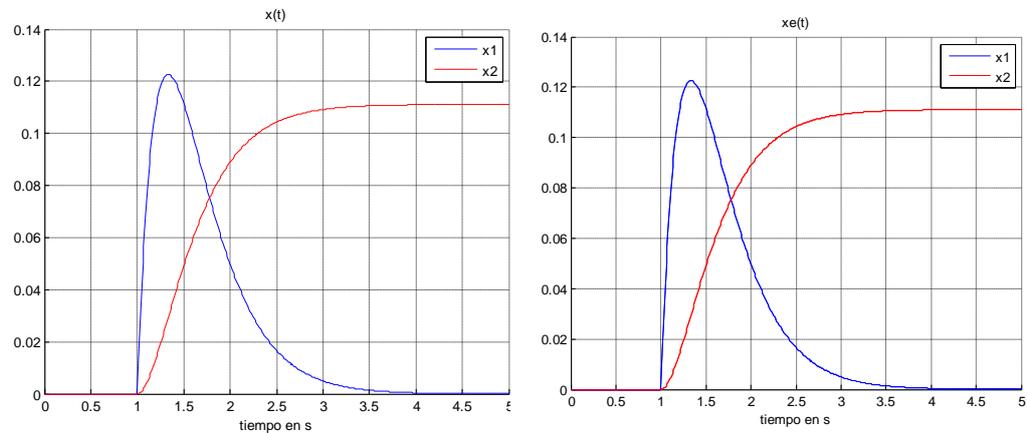


Figura 5.30 Comparación entre los estados  $x(t)$  y  $x_e(t)$

### 5.11.3 CÁLCULO DEL OBSERVADOR PARA EL SISTEMA VOLTAJE DE SALIDA

De igual manera como en el sistema frecuencia, para estimar los estados del sistema voltaje de salida se necesita determinar el valor de la matriz de realimentación  $H$ , para obtenerla utilizamos las transpuestas de las matrices  $A_{22}$  y  $C_{22}$  de la representación matricial de estados del sistema voltaje de salida.

$$A_{22}' = \begin{bmatrix} 0 & -35.64 \\ 1 & -11.94 \end{bmatrix}$$

$$C_{22}' = \begin{bmatrix} 54.42 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Otra información adicional que se requiere, tiene que ver con la ubicación de los nuevos polos del observador, como se mencionó anteriormente esta tiene que ser más rápida que la del sistema dado por  $A_{22}$ , en este caso el sistema voltaje de salida tiene una respuesta más rápida que el sistema frecuencia, por lo tanto los nuevos polos del sistema observador deben estar más alejados del eje imaginario del plano complejo  $s$ .

$$p_{o22} = [-40 \quad -41]$$

Ecuación 5.71 Ubicación de los polos del observador del sistema voltaje de salida

Con esta información se utiliza la instrucción `place` para determinar el valor de la matriz  $H_{22}$ .

$$H_{22} = \text{place}(A'_{22}, B'_{22}, p_{o22})$$

La matriz  $H$  representada por  $H_{22}$ , que se obtiene al ejecutar esta instrucción en Matlab es la siguiente.

$$H_{22} = \begin{bmatrix} 14.329 \\ 1.269 \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.72 Vector de realimentación del observador del sistema voltaje de salida

Una manera de demostrar que los nuevos polos del observador están dados por el vector  $p_{22}$ , es determinando los valores propios de  $A_{22} - H_{22}C_{22}$ , esto se lo puede realizar en Matlab por medio de la instrucción `eig`.

$$F_{22} = A_{22} - H_{22}C_{22} = \begin{bmatrix} -11.94 & -815.4236 \\ 11 & -69.06 \end{bmatrix}$$

$$\text{eig}(F_{22})=p_{022}$$

Para demostrar que el observador calculado estima los estados del sistema, se procede a realizar una simulación en el Simulink de Matlab, donde se somete al sistema a prueba por medio de una entrada tipo escalon, en la figura 5.31 se muestra el diagrama de la simulación, donde los bloques de color amarillo representan al sistema frecuencia y los bloques de color naranja al observador.

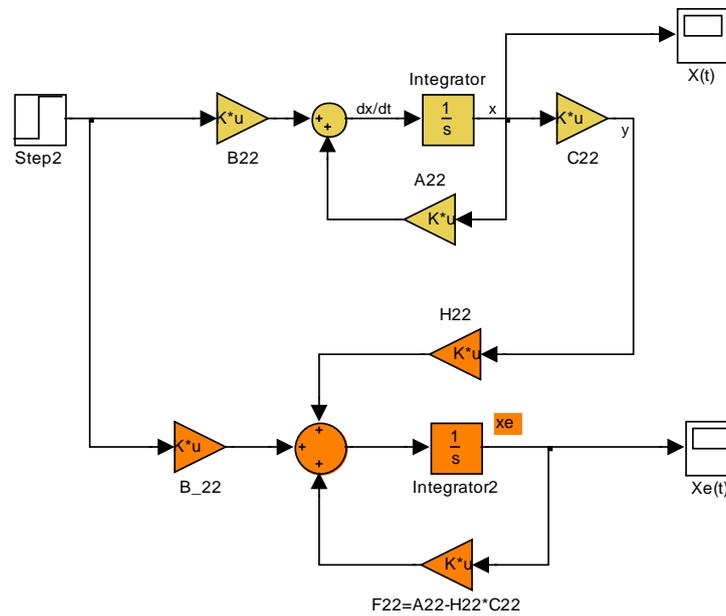


Figura 5.31 Observador del sistema voltaje de salida

En la figura 4.12 se muestra el resultado obtenido de la simulación, en esta figura se puede apreciar que los estados  $x_7$  y  $x_8$  estimados son iguales a los originales.

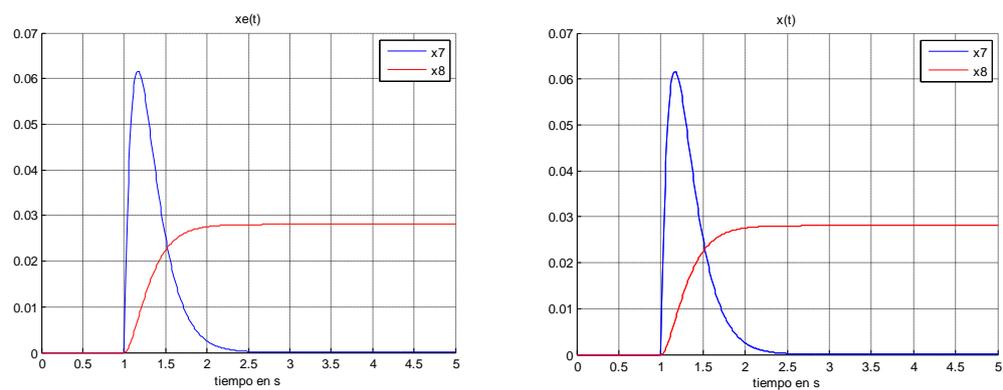


Figura 5.32 Comparación entre los estados  $x(t)$  y  $x_e(t)$

## 5.12 SIMULACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE UTILIZANDO EL MODELO INTERNO.

Obtenido el desacoplador, la matriz de realimentación del modelo interno y el observador, se procede a crear un modelo en SIMULINK para verificar que se cumplan las especificaciones de funcionamiento.

El modelo construido en SIMULINK para verificar el funcionamiento del sistema, se muestra en la Figura 5.33

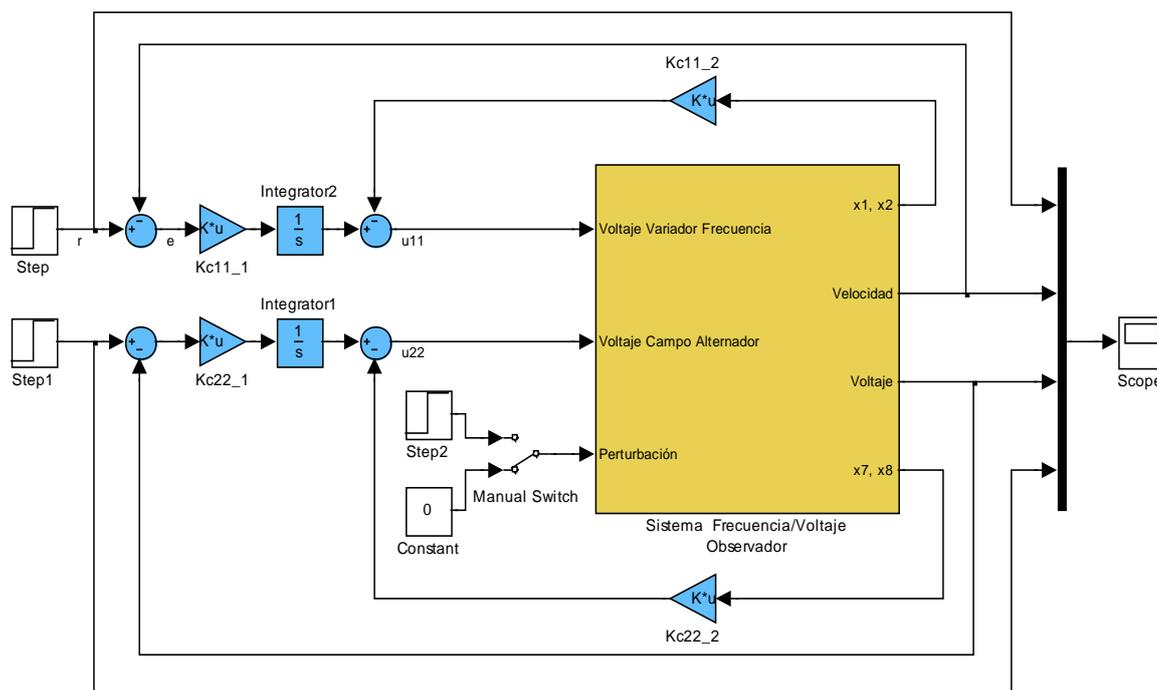


Figura 5.33 Modelo de Simulink del sistema frecuencia-voltaje con controlador de modelo interno.

El modelo de la figura 5.33 está diseñado en forma de capas, de tal forma que la primera capa contiene los valores de la matriz de realimentación del modelo interno, los valores de referencia step, step 1 y step 2 que generan una entrada tipo escalón, y el subsistema observador que representa la segunda capa del modelo que se muestra en la figura 5.34.

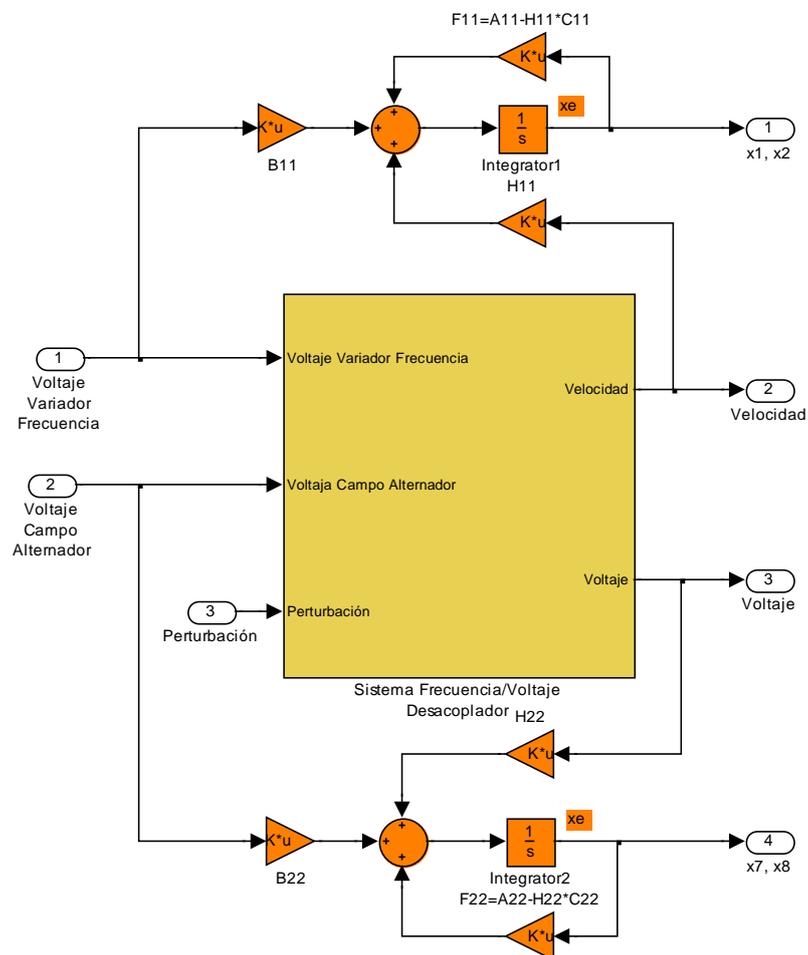


Figura 5.34 Modelo de Simulink del sistema frecuencia-voltaje, subsistema observador.

La segunda capa, mostrada en la figura 5.34, contiene el observador diseñado en la sección anterior, y un subsistema llamado desacoplador, que se muestra en la figura 5.35.

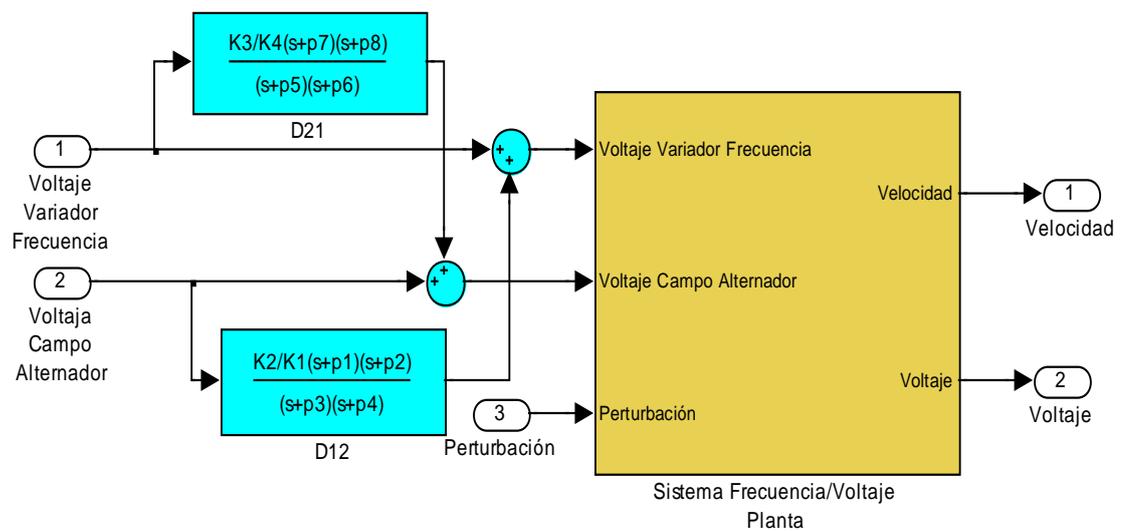


Figura 5.35 Modelo de Simulink del sistema frecuencia-voltaje, subsistema Desacoplador.

La tercera capa mostrada en la figura 5.35 contiene el desacoplador del sistema frecuencia-voltaje y el subsistema planta, que se muestra en la figura 5.36.

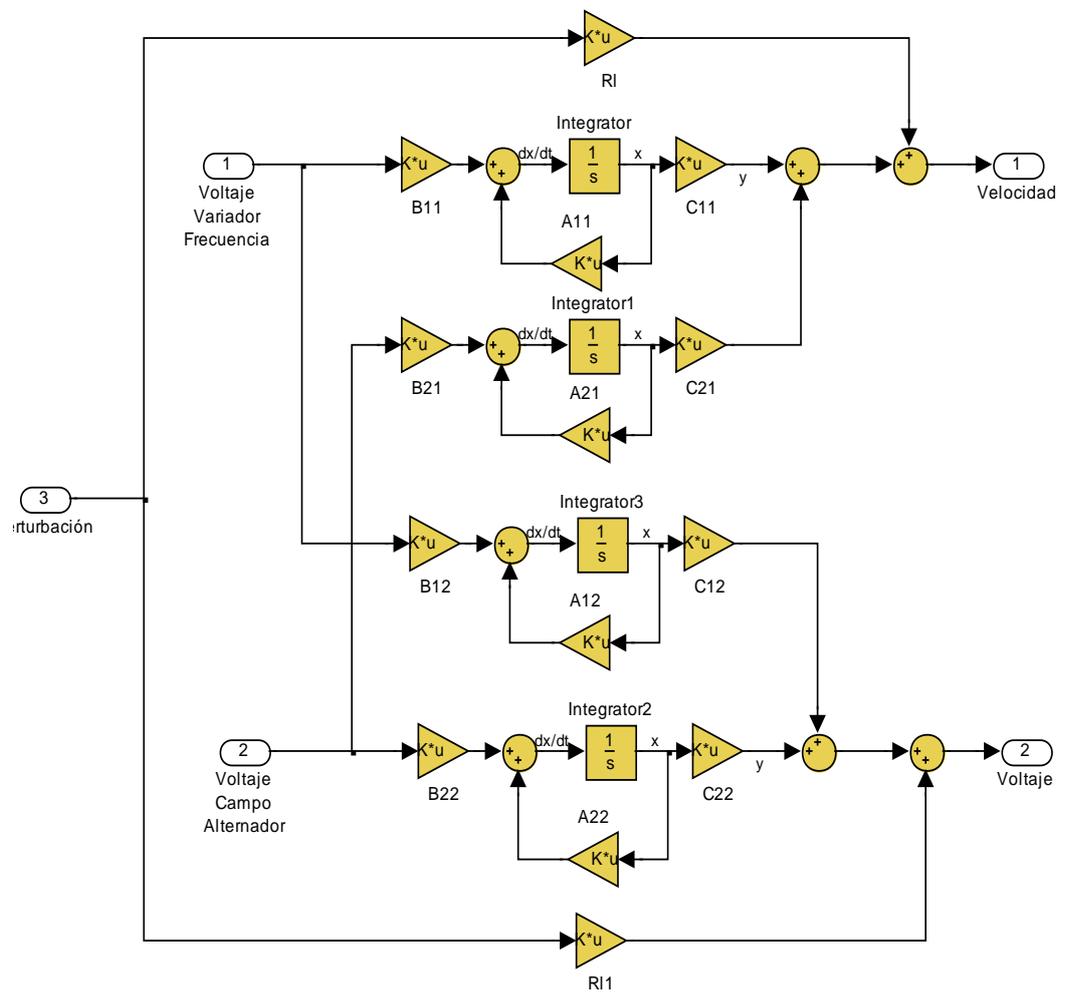


Figura 5.36 Modelo de Simulink del sistema frecuencia-voltaje, subsistema Planta.

La cuarta y última capa mostrada en la figura 5.36, contiene los datos de la planta identificada.

El resultado de la simulación se la puede observar en la figura 5.37

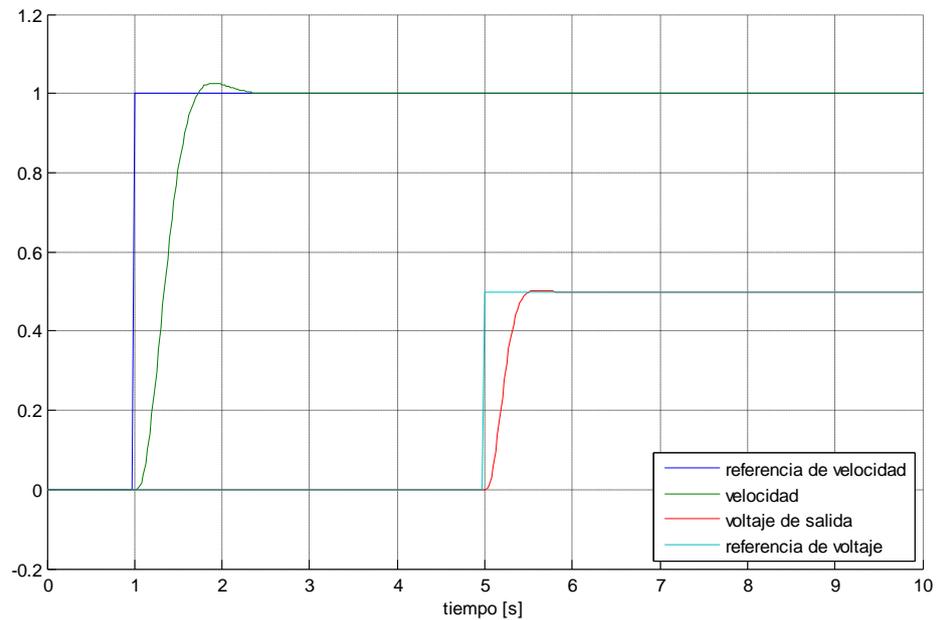


Figura 5.37 Simulación del sistema frecuencia-voltaje utilizando modelo interno.

En la figura 5.37 se puede observar que el error de estado estacionario es cero en ambos sistemas y Las respuestas de periodo transitorio son las siguientes: El sistema frecuencia tiene un tiempo de estabilización de 1 segundo, un sobrenivel porcentual del 3%. El sistema voltaje de salida tiene un tiempo de estabilización de 0.5 segundo y un sobrenivel porcentual del 2%, por lo tanto se cumplen con las especificaciones de funcionamiento.

En la figura 5.38 se muestra la respuesta del sistema cuando es perturbado, se puede apreciar que a los ocho segundos de la simulación se prueba al sistema con una entrada tipo escalón que representa una

variación de la carga del sistema, esta perturbación provoca una pequeña variación en el voltaje de salida y en la velocidad del sistema, pero ambos se recuperan manteniendo el error de estado estacionario igual a cero.

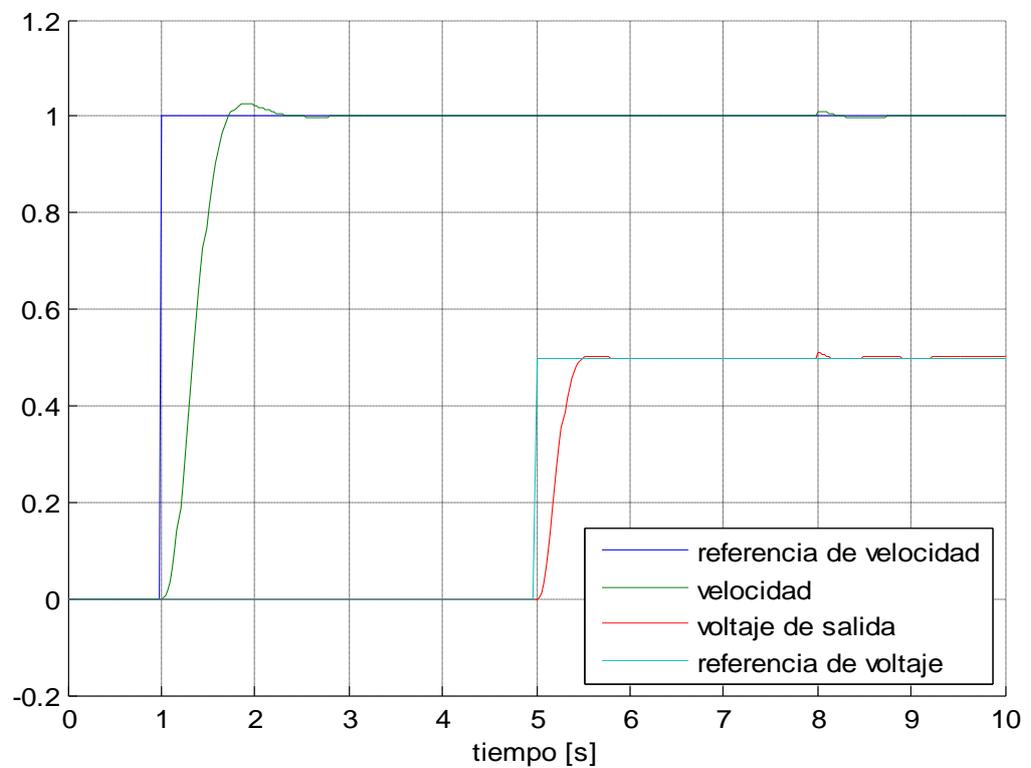


Figura 5.38 Respuesta del sistema frecuencia-voltaje sometido a una perturbación

### 5.13 PRUEBA Y AJUSTE FINO DEL CONTROLADOR EN EL BANCO DE PRUEBA.

Hasta el momento ha sido probado el controlador en las simulaciones, hay que probarlo en el banco de prueba, y para este fin se construye el modelo mostrado en la Figura 5.39.

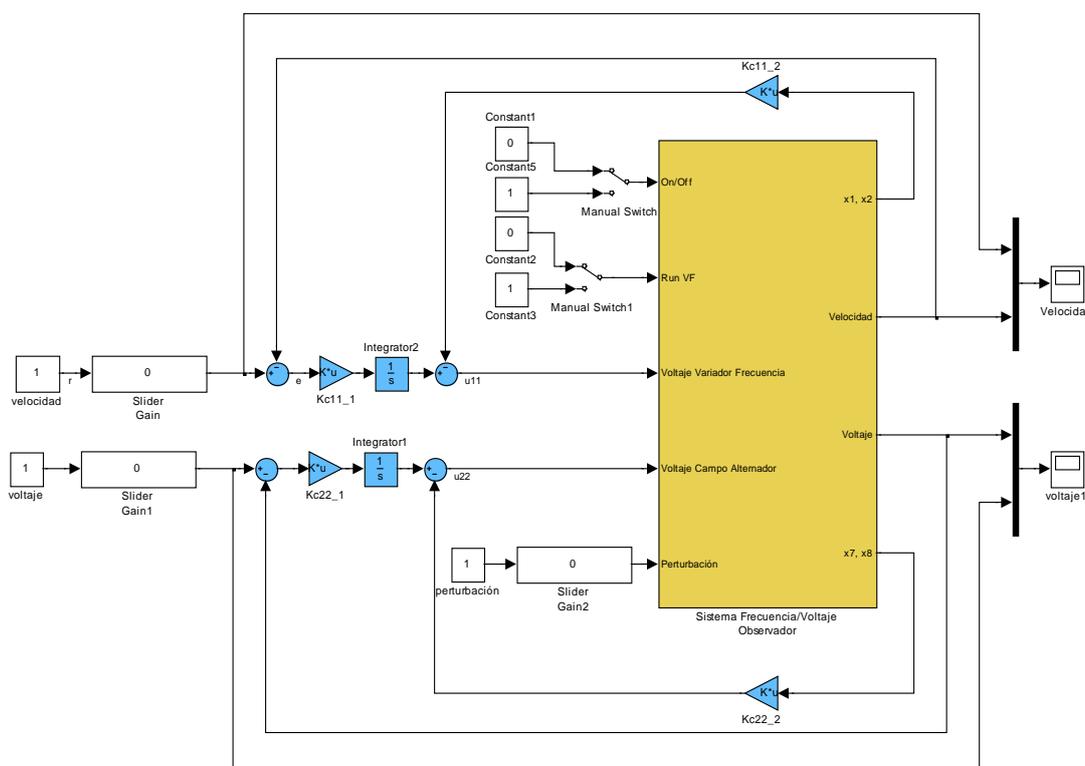


Figura 5.39 Modelo de Simulink del sistema frecuencia-voltaje con controlador de modelo interno para la planta real.

El modelo de la figura 5.39 tiene la misma forma del modelo de la simulación, está compuesto por cuatro capas, la primera capa vista en

la figura 5.40 contiene: El control para encender y apagar la planta (on/off), el control para poner en marcha al variador de frecuencia (RunVf), slider gain y slider gain 1 para llevar a la planta a su punto de operación, slider gain 2 para variar la carga del sistema y el subsistema observador que se muestra en la figura 5.40.

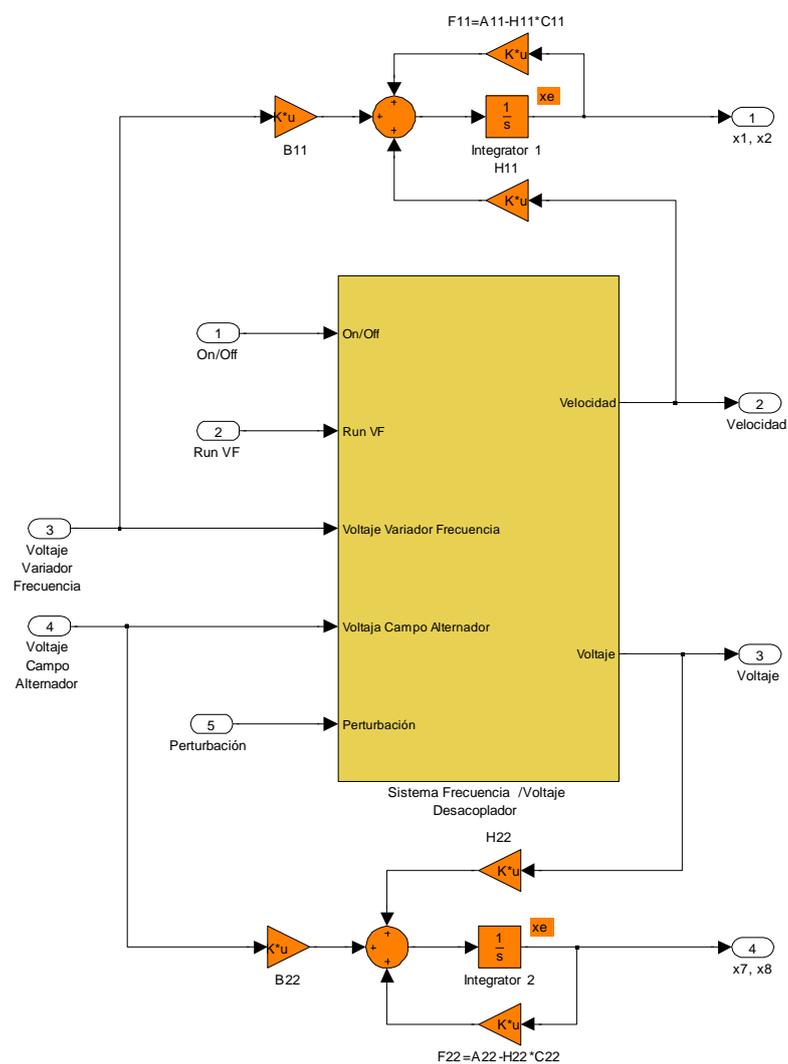


Figura 5.40 Subsistema observador de la planta real

La segunda capa mostrada en la figura 5.40 contiene el observador que estima las variables de estado y el subsistema desacoplador, mostrado en la figura 5.41.

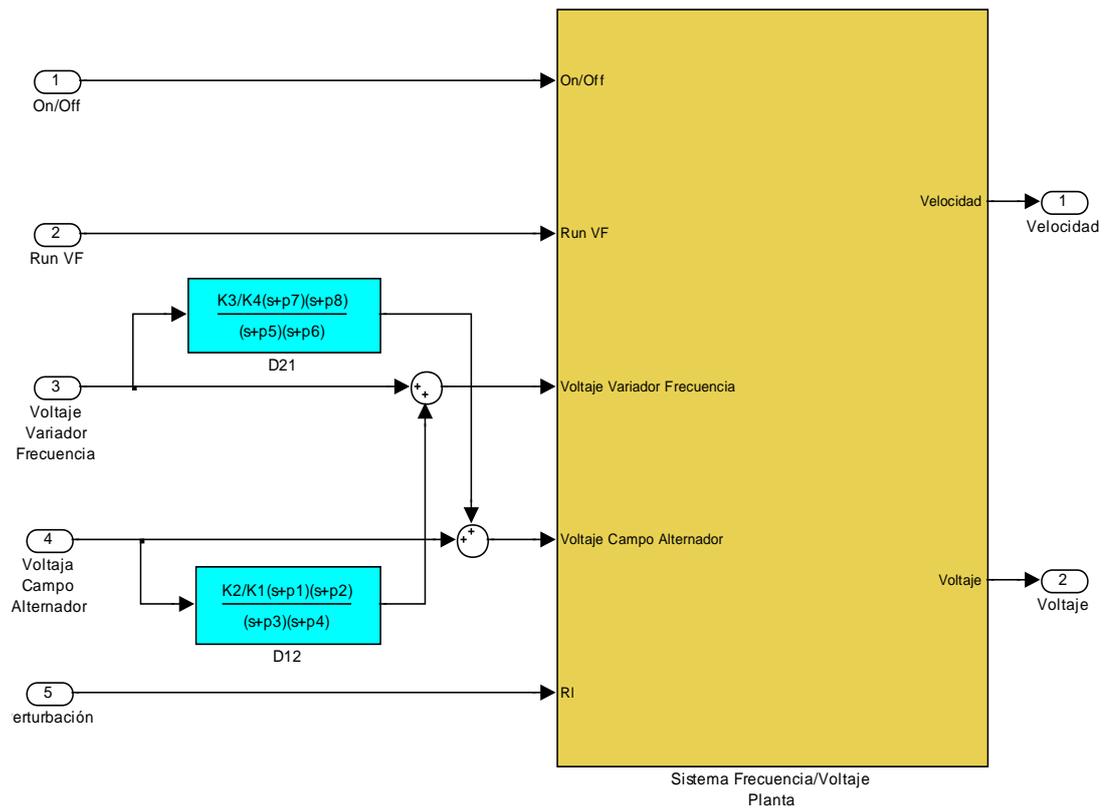


Figura 5.41 Subsistema Desacoplador de la planta real

La tercera capa mostrada en la figura 5.41 contiene el desacoplador y el subsistema planta, mostrado en la figura 5.42.

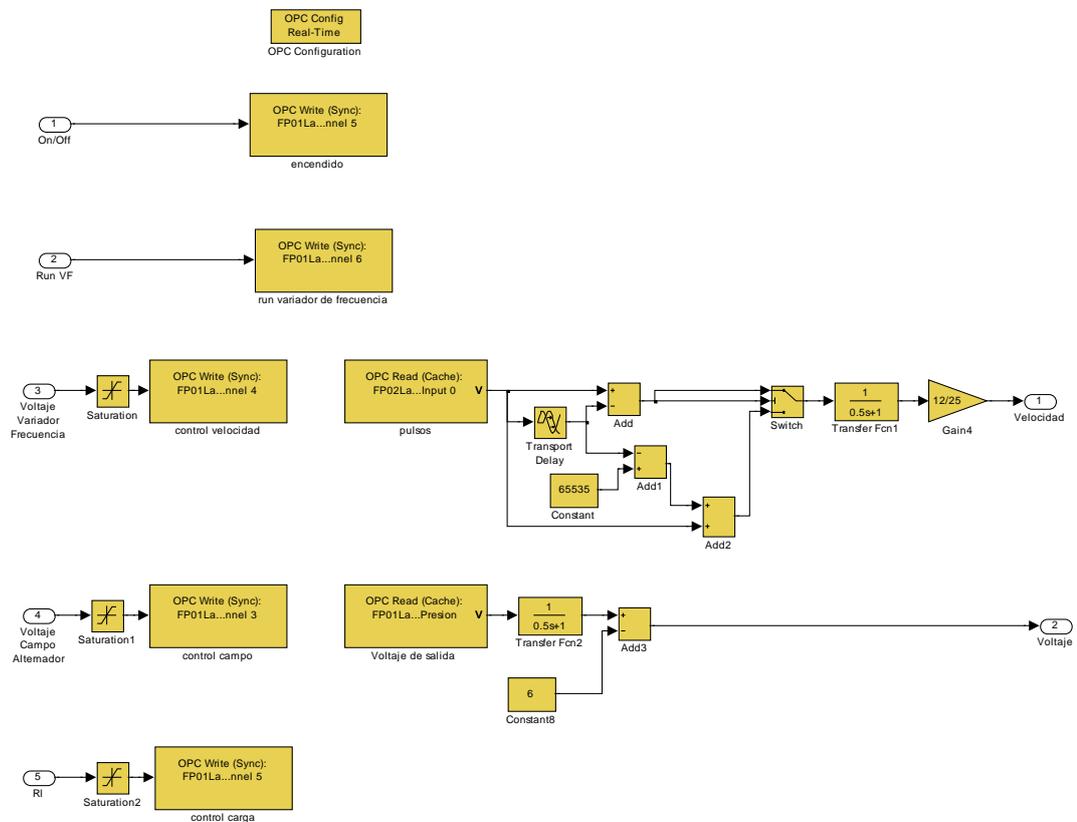


Figura 5.42 Subsistema Planta

La cuarta y última capa mostrada en la figura 5.42 contiene la configuración para el envío y adquisición de datos por medio del cFP.

[34]

---

34Compact Field Point (cFP) es un equipo producido por la Nacional Instruments que permite interactuar computadores con dispositivos eléctricos y/o electrónicos usados para control.

En el anexo B se muestra la configuración de los parámetros de la simulación en la planta real y de los bloques del subsistema planta.

Al realizar las pruebas en la planta real se realizaron pequeños ajustes en el controlador, de tal manera que se compense ciertos detalles que no se consideran en la simulación, como por ejemplo, el ruido causado por la vibración. El ajuste realizado al controlador es el siguiente:

$K_{c11,1}$	0.04
$K_{c11,2}$	[25 102]
$K_{c22,1}$	12
$K_{c22,2}$	[18 254]

Tabla 5.1 Ajustes en la matriz de realimentación de estados

En total se realizan 3 pruebas, la primera consiste en realizar un cambio tipo escalón en la referencia de la velocidad, la forma como responde el sistema se la muestra en la figura 5.43. En esta grafica se puede observar que el tiempo de estabilización del sistema frecuencia

es de aproximadamente tres segundos, además se puede observar que el sistema voltaje de salida no se muestra alterado cuando se produce este cambio.

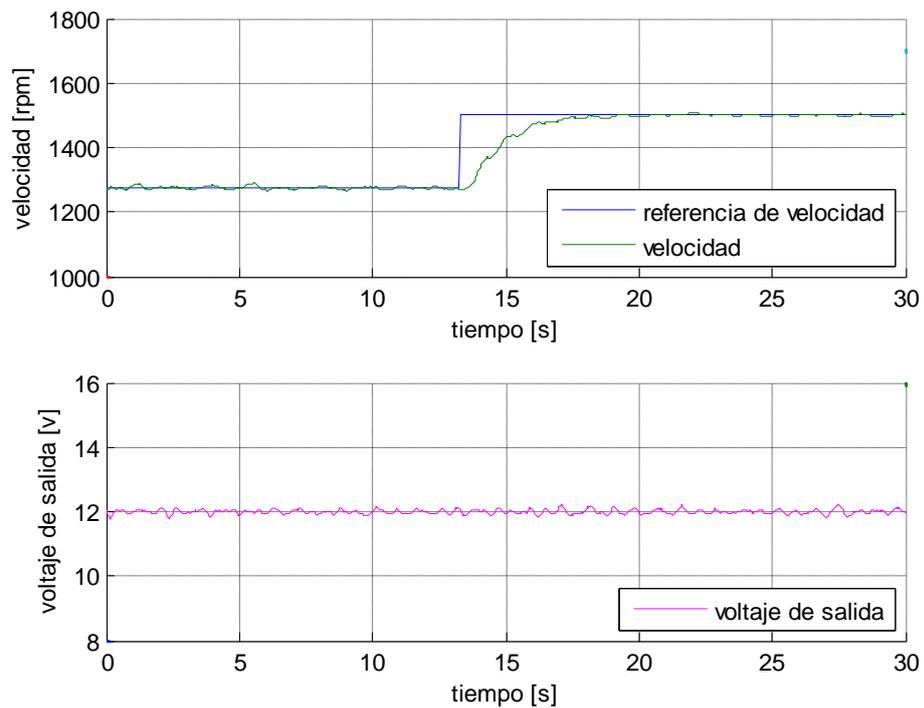


Figura 5.43 Respuesta al escalón del sistema frecuencia

La segunda prueba consiste en realizar un cambio tipo escalón, en la referencia del voltaje de salida, manteniendo constante la referencia de velocidad. La respuesta que se obtiene del sistema se muestra en la figura 5.44. En esta figura se observa que el tiempo de estabilización del voltaje de salida es menor de un segundo, además se puede observar

que no se produce ningún efecto en el voltaje de salida cuando se produce un cambio en la referencia en el sistema voltaje de salida, esto demuestra que ambos sistemas están completamente desacoplados.

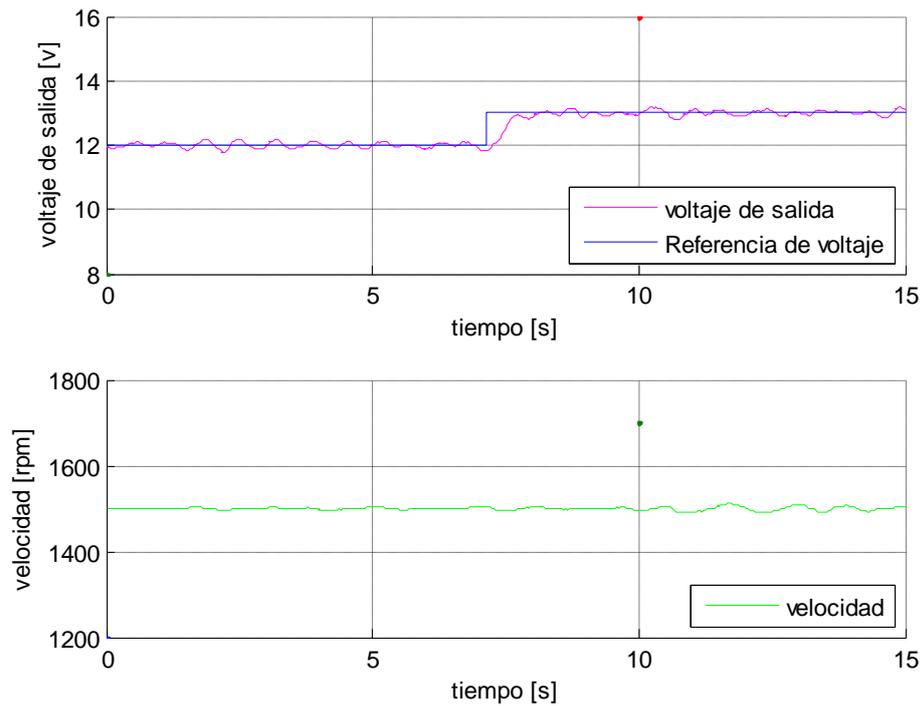


Figura 5.44 Respuesta al escalón del sistema voltaje de salida.

La tercera y última prueba consiste en observar la respuesta del sistema cuando es perturbado por medio de una variación de la carga del sistema. Para apreciar el efecto de la perturbación se ajusta la referencia de velocidad en 1525 [rpm], y la referencia de voltaje en 15 [v]. En esta prueba se inicia con un valor de voltaje de perturbación de

0 [v], que produce una carga de 3.5 [ $\Omega$ ] en cada fase, esto genera un consumo de 64 [watts]. Luego se cambia el voltaje de perturbación a 3.5 [V], cambiando el valor de la carga del sistema a 1.4 [ $\Omega$ ], generando un consumo de 161 [w]. En la figura 4.23 se muestra la gráfica correspondiente a la carga conectada al sistema con respecto al voltaje del motor de paso. Se debe considerar que existe una protección en el reóstato trifásico de tal manera que valor máximo al que puede llegar la carga del sistema en cada fase es 1.4  $\Omega$ . Si no existiera tal protección, al aumento de la carga podría causar un cortocircuito.

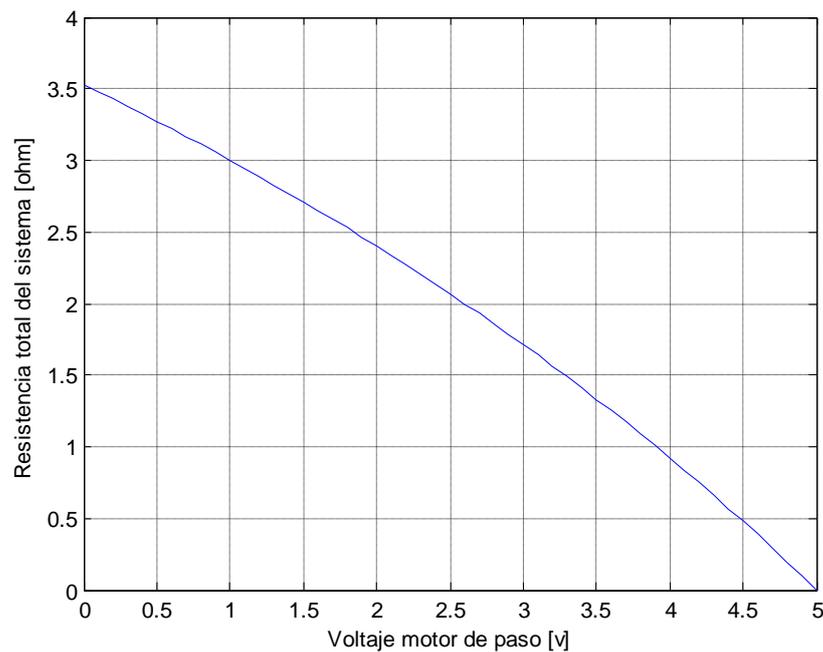


Figura 5.45 Carga del sistema vs voltaje motor de paso

En la figura 5.46 se puede observar que la velocidad y el voltaje se mantiene con error de estado estacionario cero, también que el efecto de la perturbación no se aprecia en la señal de velocidad y de voltaje, debido que el control realiza el ajustes más rápido que la variación de la carga. Pero si se puede apreciar el efecto que produce la variación de la carga en el voltaje de entrada al variador de frecuencia y el voltaje de campo del alternador, que son las señales que realizan las medidas correctivas para controlar el sistema.

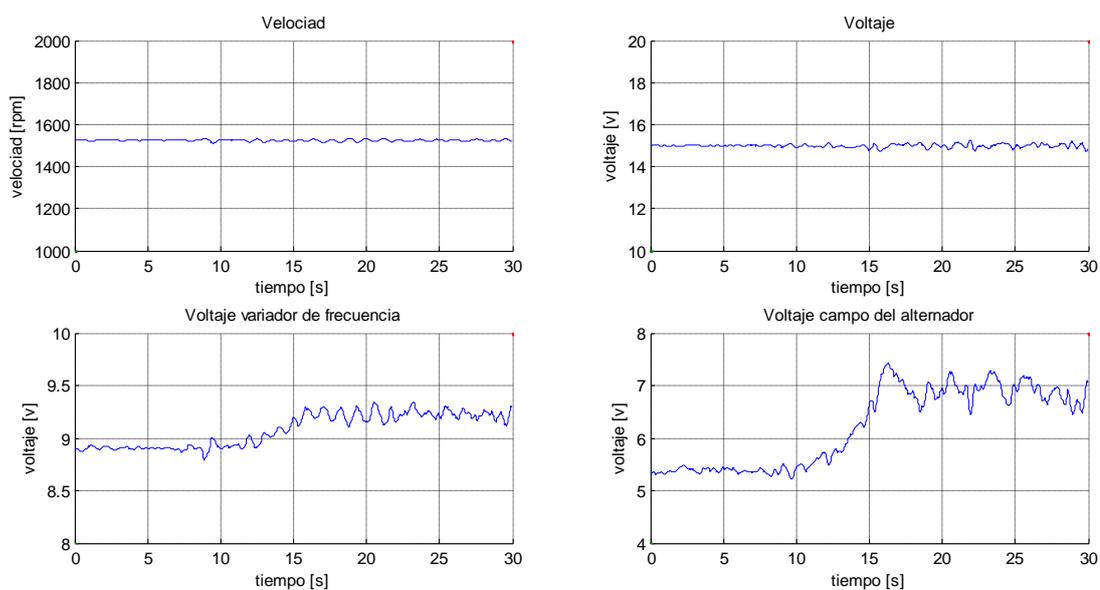


Figura 5.46 Prueba del sistema perturbado.

## CONCLUSIONES

- 1) El diseño de la estructura del sistema, cumplió con las expectativas expuesta en la etapa de diseño, que fueron pensadas en base a estandarizar los equipos existentes en el laboratorio de control automático y además que sean robustos
- 2) El diseño de la parte mecánica del sistema permite que exista una mínima vibración y lo más importante que pueda ser usada en forma segura, protegiendo al usuario de cualquier tipo de riesgo físico.
- 3) El diseño de la parte eléctrica ofrece una sólida protección de los equipos durante la operación del sistema, además permite que el sistema sea operado en dos modalidades manual automático.
- 4) El modelo matemático que se obtuvo al representar el motor como un motor DC y al alternador como un generador DC da una buena aproximación del comportamiento dinámico del sistema frecuencia-voltaje.

- 5) EL modelo en SIMULINK usado para la adquisición de datos del sistema, permitió por medio de la herramienta IDENT de MATLAB identificar las cuatro funciones de transferencia del sistemas con aproximaciones del 80%, 65%, 77% y del 84%.
  
- 6) Se inició con la representación del sistema en función de transferencia para luego representar el sistema en variables de estado, demostrando que ambas representan al mismo sistema.
  
- 7) Como se trata de un sistema multivariable (MIMO), primero se determinó el índice de acoplamiento entre las variables para luego por medio de un desacoplador dinámico desacoplar las variables de interés del sistema, obteniendo finalmente dos sistemas totalmente independientes.
  
- 8) Al diseñar el observador se cumplió con la recomendación de que los polos del observador, tiene que tener una dinámica más rápida que la del sistema. De tal manera que se pudo demostrar en la simulación que los estados estimados seguían a los estados originales del sistema.

- 9) El diseño del controlador del sistema frecuencia-voltaje cumple con las especificaciones de sobrenivel porcentual y tiempo de estabilización especificada para ambos sistemas. Tal como se muestra en las simulaciones realizadas en el simulink de Matlab del sistema controlado.
  
- 10) El ajuste del controlador realizado en la planta real genera un aumento en el tiempo de estabilización y una disminución del sobrenivel porcentual del sistema frecuencia, lo importante es que el comportamiento dinámico del sistema se mantiene dentro del rango de las especificaciones de funcionamiento.
  
- 11) El sistema frecuencia-voltaje puede realizar el control frente a cambios referencia o seteo (servo control) y también el control frente a variaciones de carga o perturbación (control regulador), manteniendo las especificaciones de funcionamiento como el error de estado estacionario, tiempo de estabilización, sobrenivel porcentual.

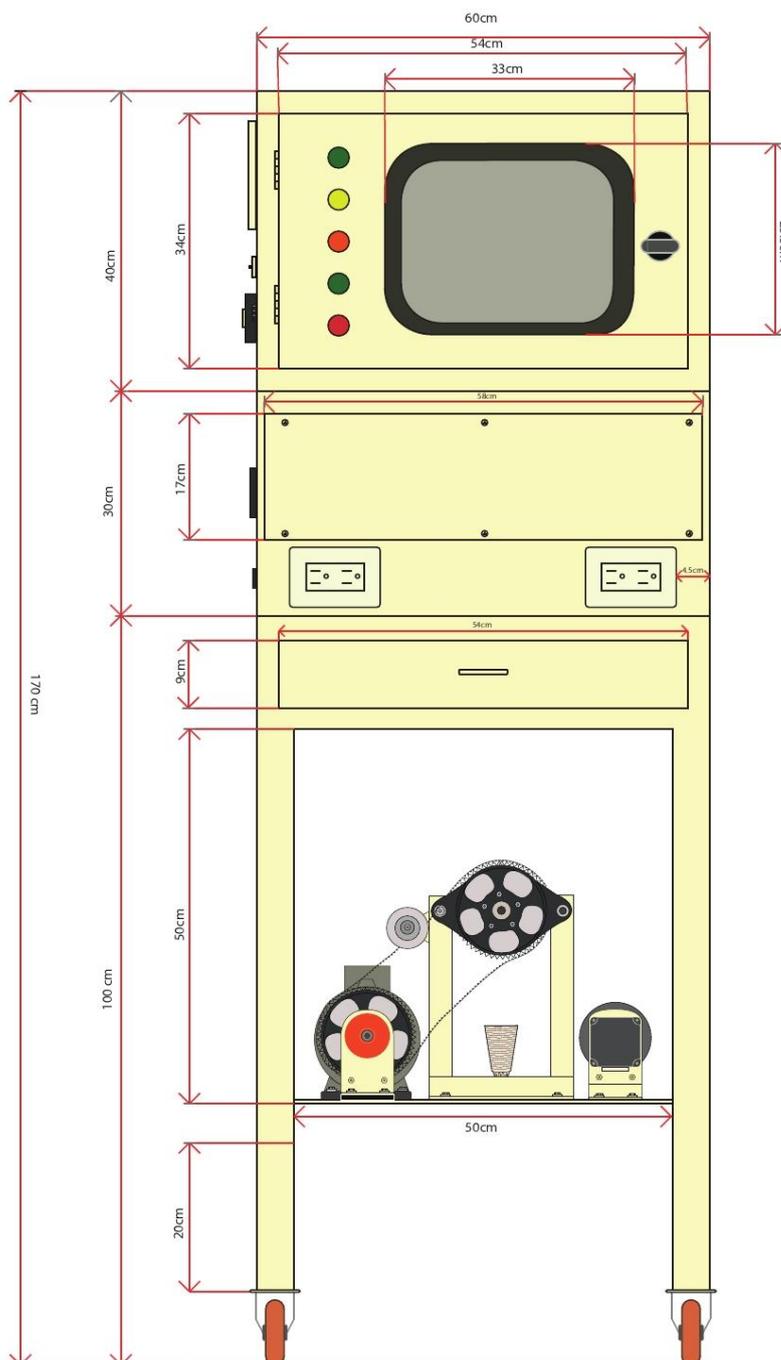
## RECOMENDACIONES

- 1) Aunque el sistema frecuencia voltaje es un banco de prueba robusto, es importante manipularlo con cuidado y darle un mantenimiento periódico.
  
- 2) El modelo en Simulink usado para controlar el sistema frecuencia-voltaje es operado de tal manera que el valor de referencia o set-point inicial para ambos es cero. El sistema es llevado de a poco a sus niveles nominales de operación.
  
- 3) El algoritmo o modelo en Simulink usado para convertir los pulsos contados por el cFP ctr-502 en velocidad tiene muchos procesos. Es importante optimizar este algoritmo de tal manera que no afecte la medición en tiempo real de las variables velocidad y voltaje.
  
- 4) Previo al diseño del controlador se desacoplo el sistema obteniendo dos sistemas totalmente independientes para luego diseñar un controlador para cada uno. Sería importante analizar el sistema completo y diseñar un controlador por el método de reubicación de polos del modelo interno sin desacoplar el sistema frecuencia-voltaje.

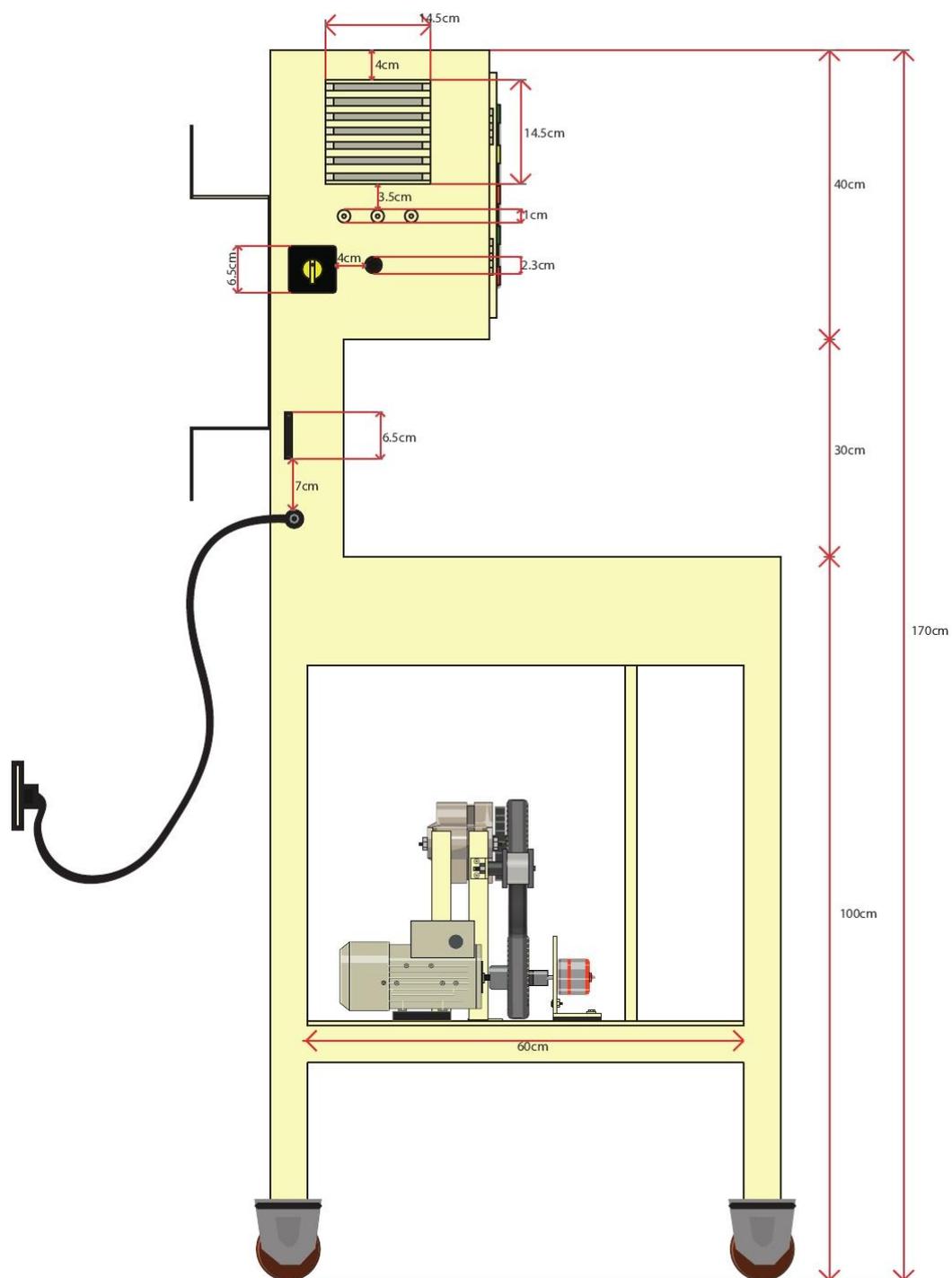
- 5) Aplicar otras técnicas de control para sistemas multivariable, y compararlo con el controlador diseñado en este proyecto de graduación, de tal manera que se puedan analizar los resultados obtenidos.

**ANEXO A: VISTAS DEL DISEÑO DE LA PLANTA**

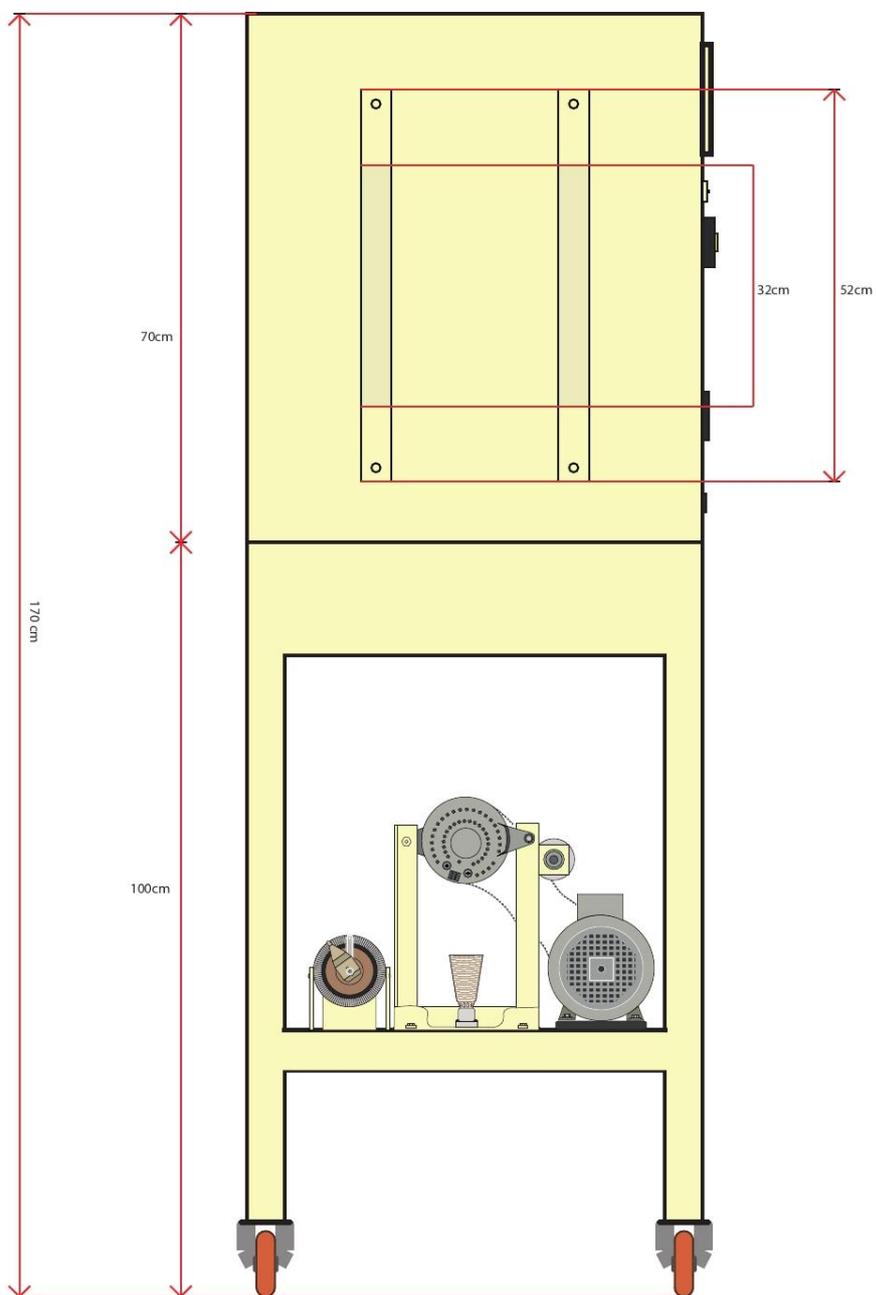
Vista frontal



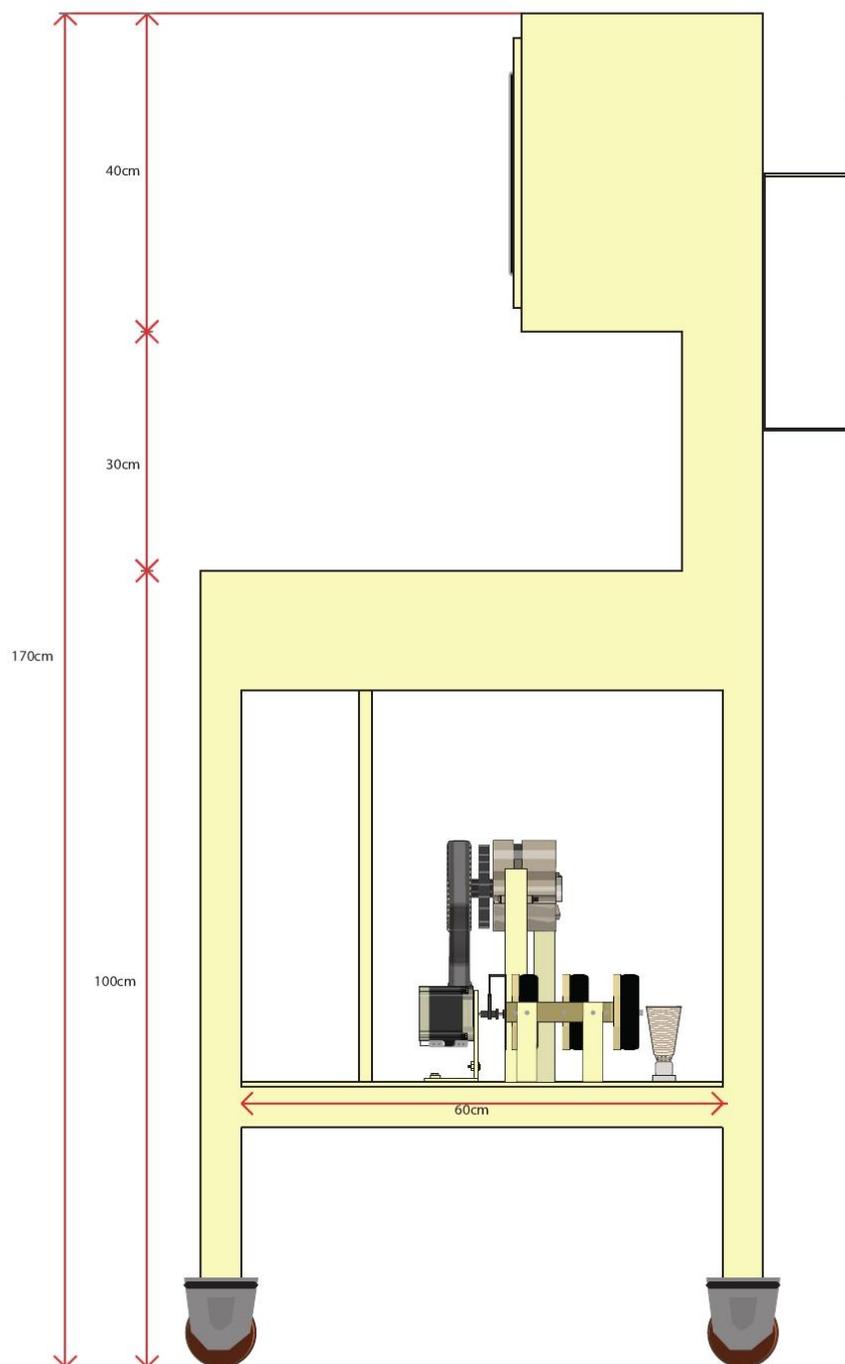
## Vista lateral derecha



## Vista posterior

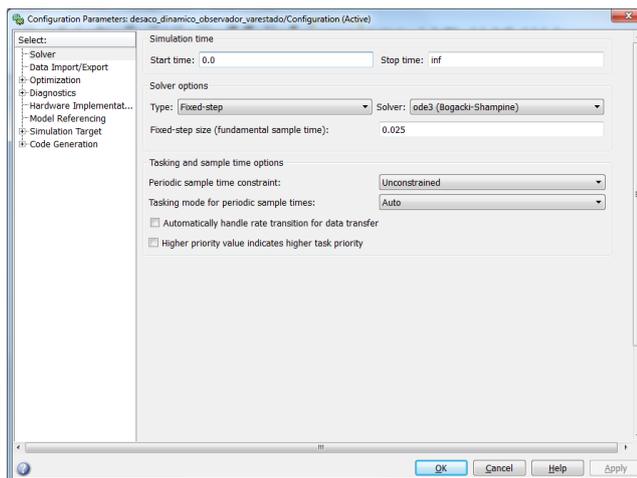


Vista lateral izquierda

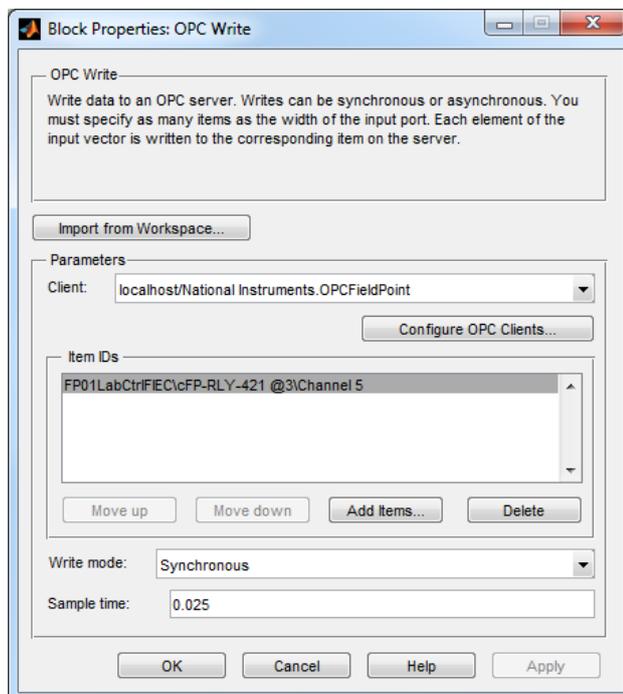


## ANEXO B: CONFIGURACIÓN DE LOS PARAMETROS DE LA SIMULACIÓN EN LA PLANTA REAL Y DE LOS BLOQUES OPC

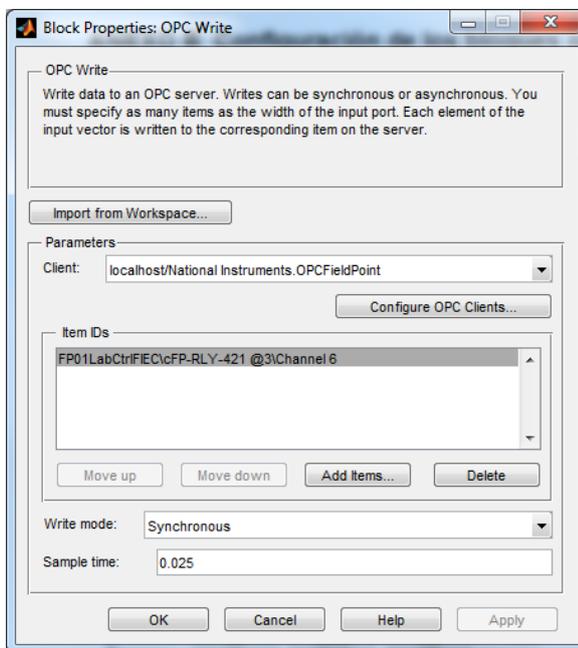
### Configuración de los parámetros de la simulación



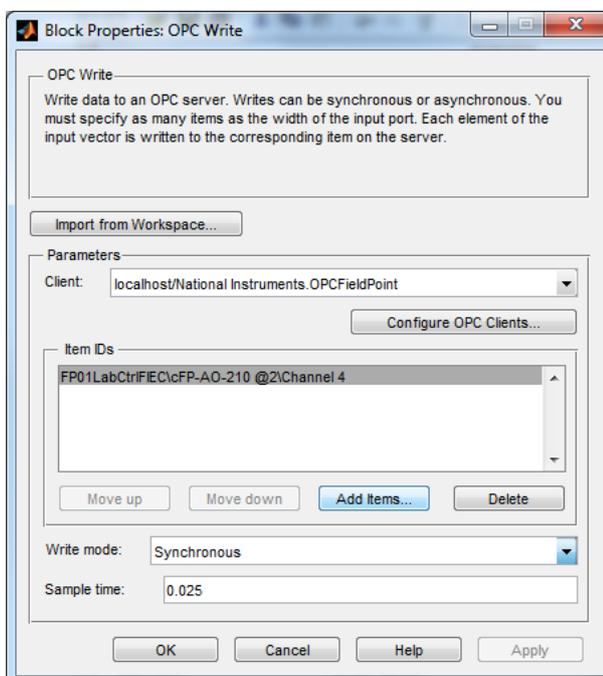
### Configuración del bloque encendido



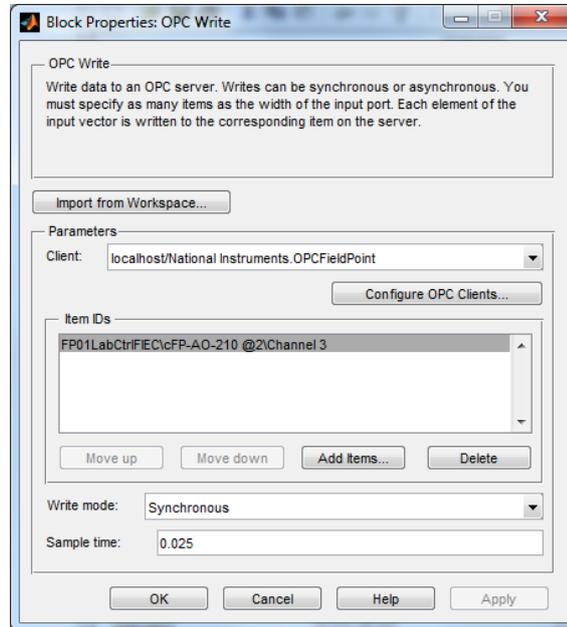
## Configuración del bloque run variador de frecuencia



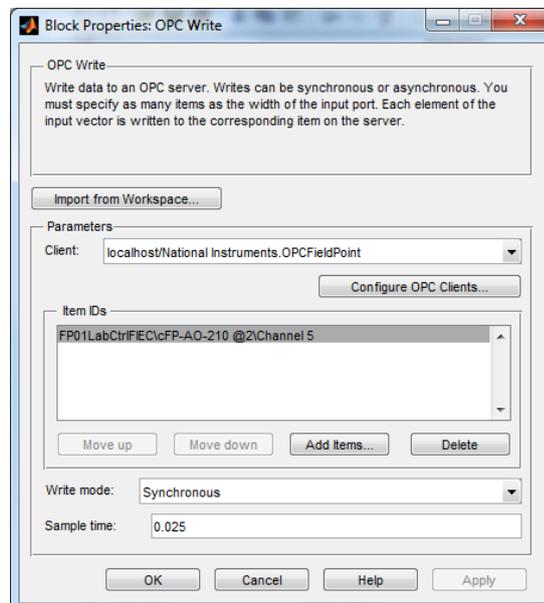
## Configuración del bloque control de velocidad



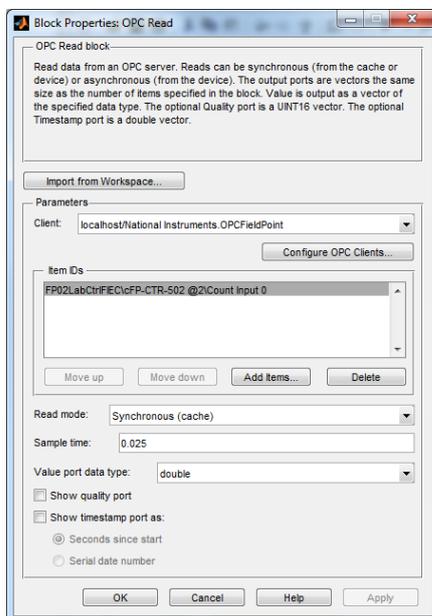
## Configuración del bloque control campo



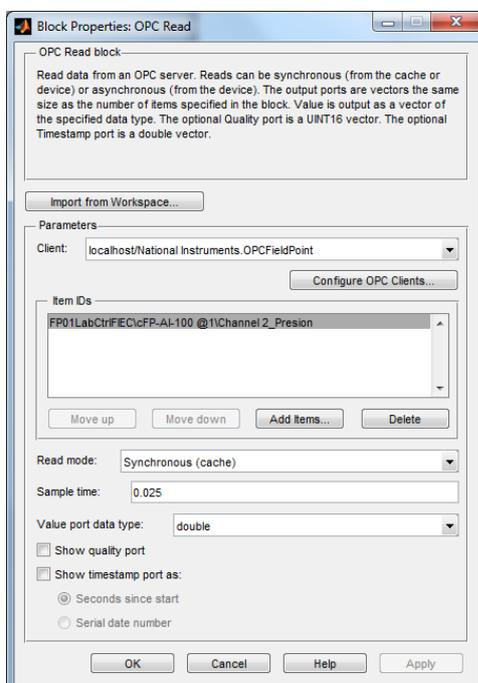
## Configuración del bloque control carga



## Configuración del bloque pulso



## Configuración del bloque voltaje de salida



## ANEXO C: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS

### Motor Siemens 1LA7070-4YA60

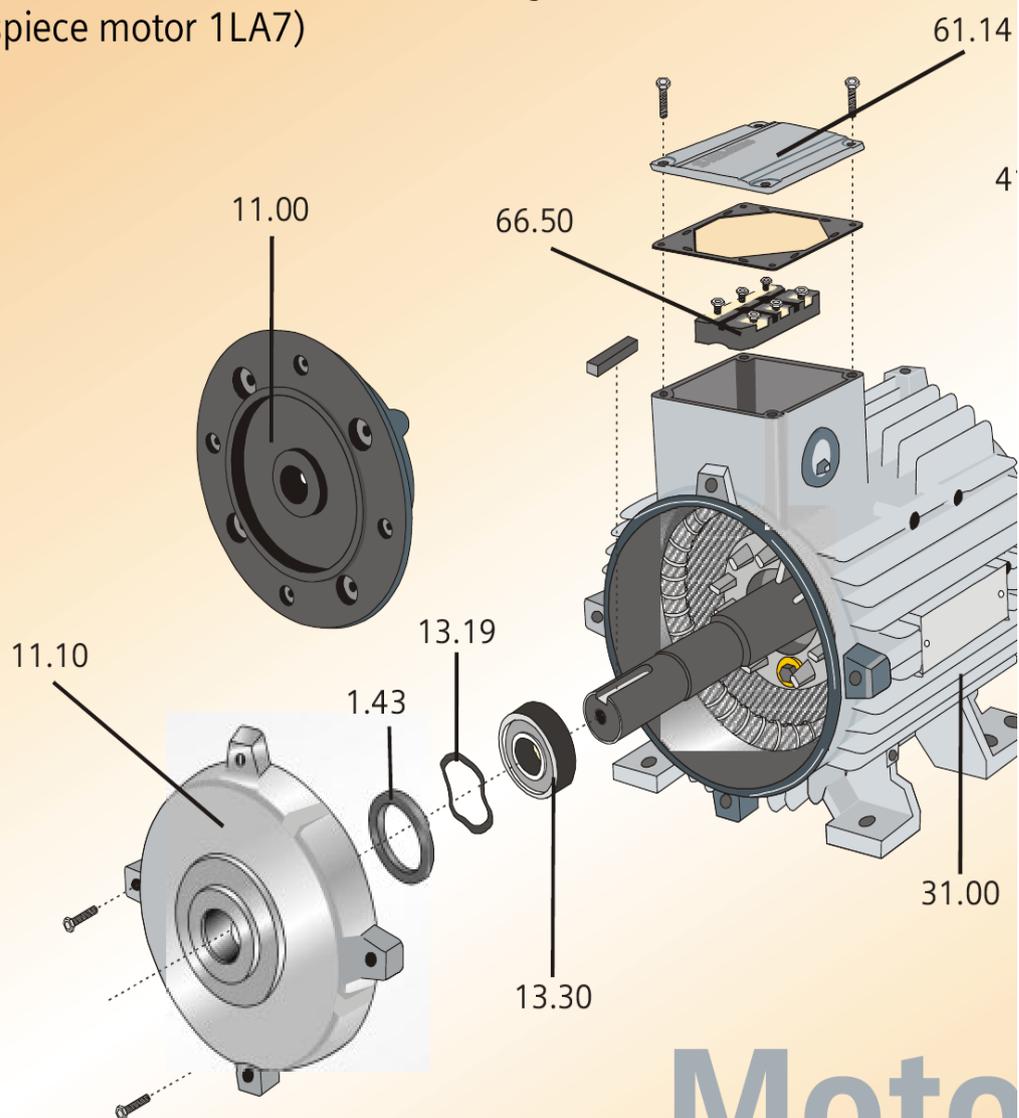
Velocidad 1800 rpm, 4 polos, 60 Hz															
Código	Tipo	Frame IEC		Potencia	F.S.	In		Eficiencia $\eta$	Factor de potencia $\cos \phi$	Velocidad nominal rpm	Torque nominal Nm	Torque de arranque Tarr / Tn	Cte. de arranque Iarr / In	Momento de inercia kg m <sup>2</sup>	Peso kg
		Tamaño	HP			kW	220V A								
25000001108	1LA7 070-4YC60	71M	0,4	0,30	1,05	1,60	0,80	66	0,77	1640	1,74	1,8	2,8	0,0006	4,7
25000001109	1LA7 070-4YA60	71M	0,5	0,37	1,15	1,90	0,95	66	0,81	1590	2,24	1,3	2,7	0,0006	5,5
25000001110	1LA7 071-4YA60	71M	0,6	0,45	1,05	2,20	1,10	69	0,76	1680	2,54	1,8	3,4	0,0008	6
25000001111	1LA7 073-4YA60	71M	0,75	0,56	1,15	2,90	1,45	65	0,79	1650	3,24	1,9	3,7	0,0008	6
25000001113	1LA7 080-4YA60	80M	1	0,75	1,15	3,50	1,75	69,2	0,87	1660	4,29	1,9	3,7	0,0015	8,1
25000001114	1LA7 081-4YA60	80M	1,2	0,90	1,05	4,00	2,00	70	0,85	1675	5,10	2,2	3,7	0,0018	9,3
25000001115	1LA7 083-4YA60	80M	1,5	1,12	1,15	5,00	2,50	72	0,89	1650	6,48	1,8	3	0,0018	9,3
25000001117	1LA7 090-4YA60	90S/L	2	1,49	1,15	7,00	3,50	77	0,80	1700	8,38	2,2	4,4	0,0028	12,1
25000001118	1LA7 094-4YA60	90S/L	2,4	1,79	1,05	7,40	3,70	77	0,86	1690	10,12	2	4,5	0,0035	14,9
25000001119	1LA7 096-4YA60	90S/L	3	2,24	1,15	9,60	4,80	79	0,83	1708	12,51	1,8	3,6	0,0035	14,9
25000001120	1LA7 111-4YA60	112M	4	2,98	1,15	13,00	6,50	76,3	0,79	1750	16,28	2,2	5,6	0,0048	27,1
25000001121	1LA7 112-4YA60	112M	5	3,73	1,15	15,80	7,90	80,5	0,78	1740	20,47	2,3	6,5	0,0058	28,7
25000001122	1LA7 113-4YA60	112M	6,6	4,92	1,05	19,60	9,80	78	0,83	1740	27,02	2	6	0,011	31
25000001123	1LA7 114-4YA60	112M	7,5	5,60	1,15	23,20	11,60	80	0,79	1740	30,71	2,2	5,6	0,011	32,7
25000001124	1LA7 131-4YA70	132S/M	10	7,46	1,15	28,80	14,40	81	0,84	1750	40,71	2,3	6	0,018	46,5
25000001125	1LA7 133-4YA70	132S/M	12	8,95	1,05	34	17,00	81,2	0,83	1750	48,85	2,5	6,6	0,024	49
25000001126	1LA7 134-4YA70	132S/M	15	11,19	1,15	43	21,50	82,5	0,84	1750	61,06	1,8	5	0,024	62
25000001127	1LA5 164-4YB70	160 M/L	20	14,92	1,15	53	26,50	85	0,85	1760	80,95	1,8	6,3	0,04	77,5
25000001128	1LA5 167-4YC70	160 M/L	25	18,65	1,15	64	32,00	89	0,87	1755	101,48	1,8	5,4	0,052	85,5
25000001129	1LA4 183-4YA80	180M	30	22,38	1,05	78	39,00	90,7	0,83	1755	121,77	2	4,9	0,13	170
25000001130	1LA4 186-4YA80	180L	36	26,86	1,05	93	46,50	91,3	0,83	1760	145,71	2,8	6,8	0,15	190
25000001131	1LA4 187-4YA80	180L	40	29,84	1,05	104	52,00	91,3	0,83	1750	162,83	2	5,6	0,15	190
25000001132	1LA4 207-4YC80	200L	50	37,30	1,15	126	63,00	91,3	0,84	1760	202,38	2,7	6,8	0,24	250
25000001133	1LA6 220-4YA80	225S	60	44,76	1,15	148	74,00	96,2	0,86	1765	242,17	2,7	6,6	0,44	314
25000001134	1LA6 224-4YC80	225M	75	55,95	1,15	188	94,00	92,7	0,86	1780	300,16	2	5,1	0,52	321
26697 <sup>1)</sup>	1LG4 253-4AA60	250M	100	75,00	1,00	120,00	93,3	0,85	1780	355	2,5	6,3	0,69	390	
26698 <sup>1)</sup>	1LG4 280-4AA60	280S	125	93,00	1,00	145,00	94,2	0,85	1785	482	2,5	7,4	1,29	520	
26699 <sup>1)</sup>	1LG4 283-4AA60	280M	150	111,90	1,00	177,50	94,6	0,86	1785	579	2,5	7,4	1,47	565	
26700 <sup>1)3)</sup>	1LG4 310-4AA60	315S	200	150	1,00	240,00	94,5	0,84	1783	707	2,6	6,5	2	700	
26701 <sup>1)3)</sup>	1LG4 313-4AA60	315M	225	168	1,00	265,20	94,8	0,85	1783	848	2,8	6,9	2,46	775	
26702 <sup>1)3)</sup>	1LG4 316-4AA90-Z	315L	275	205	1,10	323,10	95,4	0,86	1783	1.028	2,8	6,9	3,01	955	
26703 <sup>1)3)</sup>	1LG4 317-4AA90-Z	315L	350	261	1,10	409,50	95,7	0,88	1785	1.285	2,8	7	3,91	1050	

- 1) Para tensión de servicio a 220V, favor consultar.
- 2) Motores de fabricación bajo pedido.
- 3) Consultar tiempo de entrega.



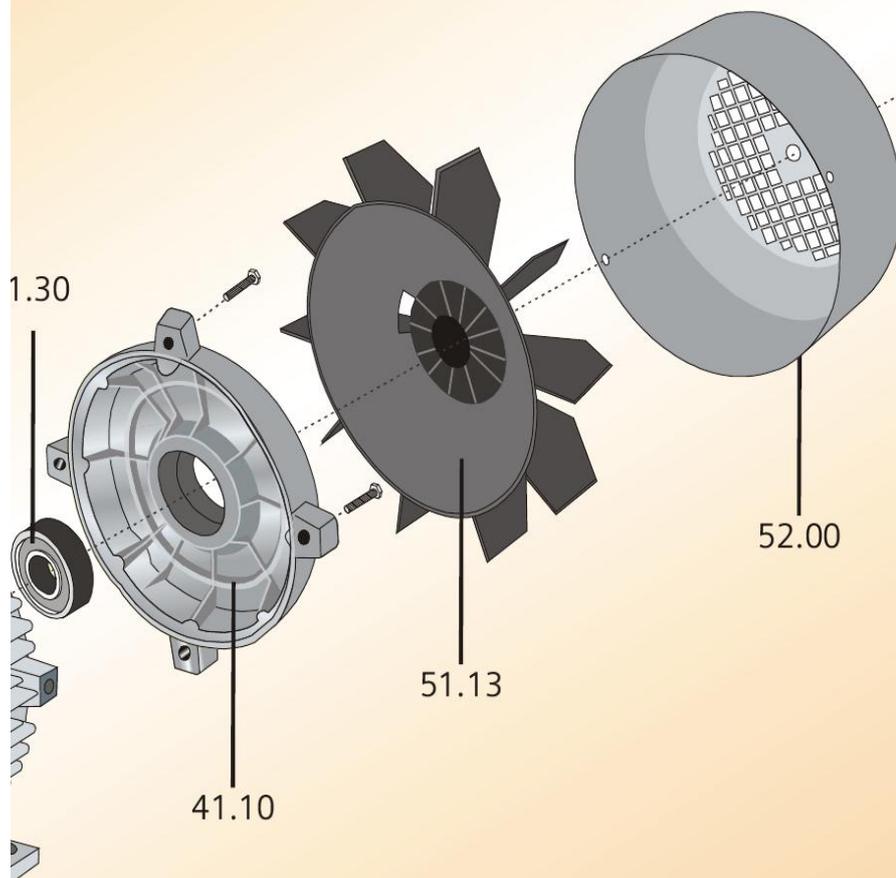
## Motores fuertes y ágiles

Diseño único con la más alta tecnología  
(Despiece motor 1LA7)



Moto  
TRIFASICOS

Disponibilidad

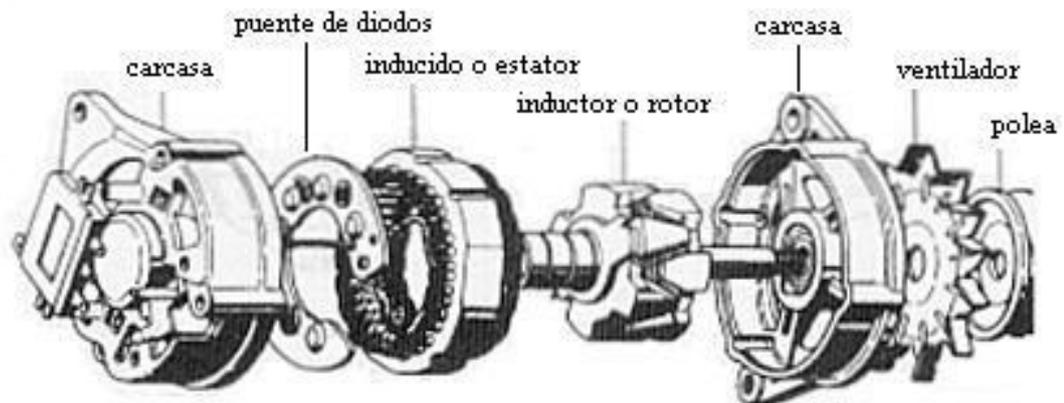


res

de repuestos en todo el país

1.43	Retenedor
11.00	Platillo AS/B5
11.10	Platillo AS/B3
13.19	Arandela de presión
13.30	Rodamiento AS
31.00	Carcasa - Estator
41.10	Platillo BS/B3
41.30	Rodamiento BS
51.30	Ventilador
52.00	Caperuza
61.14	Tapa caja de bornes
66.50	Regleta de bornes

## Alternador



Datos de placa del alternador	
Máxima potencia de salida	537 [W]
Máxima corriente de salida a full carga	43 [A]
Mínima velocidad del rotor	1270 [rpm]
Máxima corriente de campo	3,2 [A]
Corriente de dispersión a 12 [V]	0,2 [mA]
Máxima cresta de voltaje de salida	0,26 [V]

## Variador de frecuencia

ESPAÑOL

### Guía de inicio rápido - ATV312



S1A1094501

#### ⚠️ PELIGRO

##### PELIGRO DE DESCARGA ELÉCTRICA, EXPLOSIÓN O ARCO ELÉCTRICO

- Lea detenidamente esta guía de instalación rápida antes de realizar ningún procedimiento con este variador.
  - El usuario es responsable del cumplimiento de todos los requisitos de los códigos eléctricos internacionales y nacionales relacionados con la correcta conexión a masa de todo el equipo.
  - Muchas piezas de este variador, incluidas las placas de circuito impreso, funcionan a la tensión de red. NO TOCAR. Utilice sólo herramientas con aislante eléctrico.
  - NO TOQUE componentes no apantallados ni las conexiones de tornillos en regleta cuando haya tensión.
  - NO cortocircuite entre los bornes PA/+ y PC/- o entre los condensadores del bus de CC.
  - Antes de realizar el mantenimiento del variador:
    - Desconecte toda la alimentación eléctrica, incluida la alimentación del control externo que pueda estar presente.
    - Coloque una etiqueta de "NO CONECTAR" en todos los seccionadores.
    - Bloquee todos los seccionadores en la posición abierta.
    - ESPERE 15 MINUTOS para que los condensadores del bus de CC se descarguen.
    - Mida la tensión del bus de CC entre los bornes PA/+ y PC/- para asegurarse de que la tensión sea inferior a 42 Vdc.
    - Si los condensadores del bus de CC no se descargan completamente, póngase en contacto con su representante local de Schneider Electric. No repare ni haga funcionar el variador.
  - Instale y cierre todas las cubiertas antes de aplicar alimentación o de arrancar y parar el variador.
- Si no se respetan estas instrucciones, se producirán lesiones graves o incluso la muerte.**

Sólo personal cualificado deberá llevar a cabo la instalación, manejo, reparación y mantenimiento de los equipos eléctricos. Schneider Electric no asume las responsabilidades que pudieran surgir como consecuencia de la utilización de este producto.

La siguiente información está diseñada para utilizar un **único variador** conectado a un **solo motor con una longitud de cable de motor inferior a 50 metros (164 ft)**.

En cualquier otro caso, consulte la guía de instalación y programación del ATV312 en [www.schneider-electric.com](http://www.schneider-electric.com).

Compruebe los cables antes de conectar el variador con un motor (longitud, alimentación, apantallado o no apantallado). La longitud del cable del motor es de \_\_\_\_\_ (<50 metros, 164 ft).

### 1 Comprobación de la entrega del variador

- Retire el ATV312 del embalaje y compruebe que no presenta daños.

#### ⚠️ ADVERTENCIA

##### EQUIPO DAÑADO

No maneje ni instale ningún variador o accesorio del variador que parezca estar dañado.

**Si no se respetan estas instrucciones pueden producirse graves lesiones, daños materiales o incluso la muerte.**

- Asegúrese de que la referencia del variador impresa en la etiqueta coincide con la del albarán de envío correspondiente a la orden de pedido.

Escriba la referencia del modelo de variador: \_\_\_\_\_ y el número de serie: \_\_\_\_\_

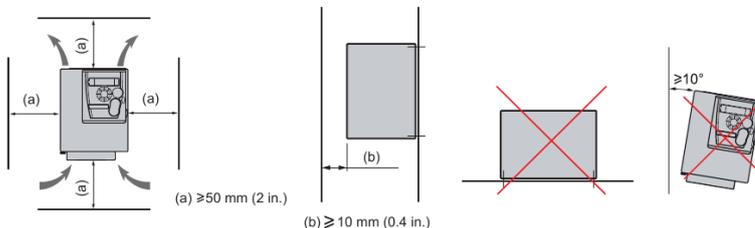


### 2 Comprobación de la compatibilidad de la tensión de red

- Verifique que la **tensión de red** sea compatible con el rango de alimentación del variador.  
Tensión de red \_\_\_\_\_ voltios / Rango de tensiones del variador \_\_\_\_\_ voltios.  
Rango del variador: ATV312...M2 = 200 ... 240 V monofásico / ATV312...M3=200 ... 240 V trifásico  
ATV312...N4 = 380 ... 500 V trifásico / ATV312...S6 = 525 ... 600 V trifásico.

### 3 Instalación del variador verticalmente

Para una temperatura del aire circundante de hasta 50 °C (122 °F).

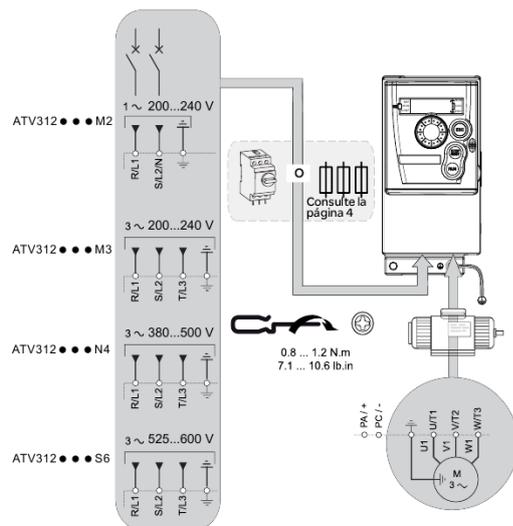


Para otras condiciones térmicas, consulte el manual de instalación en [www.schneider-electric.com](http://www.schneider-electric.com).

#### 4 Conexión del variador:

##### Alimentación

- Conecte el variador a la masa.
- Compruebe el calibre del disyuntor o del fusible (consulte la protección recomendada de los circuitos de derivación página 4).
- Compruebe que la tensión del motor es compatible con la tensión del variador.  
Tensión del motor: \_\_\_\_\_ voltios.
- Conecte el variador al motor.
- Conecte el variador a la alimentación de red.

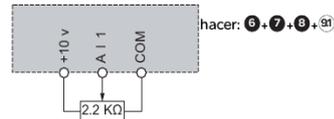


#### 5 Conexión del variador:

##### Elección del tipo de Control

##### 51 [Configuración Remoto] (Control por referencia externa)

- Cableado de la referencia de velocidad:



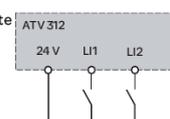
hacer: 6 + 7 + 8 + 91

- Cableado del control:

El control utiliza 2 hilos:  
Parámetro **LCC = 2C**

hacer: 6 + 7 + 8 + 91

LI1: marcha adelante  
LI2: march-a atrás

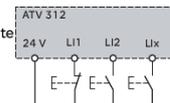


El control utiliza 3 hilos:

Parámetro **LCC = 3C**

hacer: 6 + 7 + 8 + 91

LI1: parada  
LI2: marcha adelante  
Lix: marcha atrás



- verificar SW1 = "SOURCE"



##### 52 [Configuración Local] (Control por referencia interna)



hacer: 6 + 7 + 8 + 92

#### 6 Alimentación del variador

- Compruebe que las entradas lógicas utilizadas no están activas (Consultar LI1, LI2, Lix).
- Alimente el variador.
- La primera vez que se enciende, el variador muestra **n5E** (control de 3 hilos) o **r d Y** (control de 2 hilos); después de pulsar **ENT** el variador mostrará **b F r**.
- En los siguientes arranques, el variador mostrará **n5E** o **r d Y**.



#### 7 Ajuste de los parámetros del motor

- Consulte la placa de características del motor para ajustar los parámetros siguientes en el menú **d r C**.

Menú	Código	Descripción	Ajuste de fábrica	Ajuste de cliente
<b>d r C</b> - [CONTROL DEL MOTOR]	<b>b F r</b>	[Frec. estándar motor]: Frecuencia estándar del motor (Hz)	50.0	
	<b>U n 5</b>	[Tensión nom. motor]: Tensión nominal del motor en la placa de características del motor (V)		Calibre del variador
	<b>F r 5</b>	[Frec. nom. motor]: Frecuencia nominal del motor en la placa de características del motor (Hz)	50.0	
	<b>n C r</b>	[Frec. nom. motor]: Corriente nominal del motor en la placa de características del motor (A)		Calibre del variador
	<b>n 5 P</b>	[Vel. nominal motor]: Velocidad nominal del motor en la placa de características del motor (rpm)		Calibre del variador
	<b>C 0 5</b>	[Motor 1 cos φ]: Cos φ nominal del motor en la placa de características del motor		Calibre del variador

## 7 Ajuste de los parámetros del motor (continuación)

- Ajuste el parámetro **tUn** a **YES**.

Menú	Código	Descripción	Ajuste de fábrica	Ajuste de cliente
<b>drc-</b> [CONTROL DEL MOTOR]	<b>tUn</b>	[Autoajuste]: Autoajuste para <b>UnS, FrS, nCr, nSP, nPr</b> y <b>CD5</b> .	<b>nD</b>	

**⚠ PELIGRO**

**PELIGRO DE DESCARGA ELÉCTRICA O ARCO ELÉCTRICO**

- Durante el autoajuste, el motor funciona a corriente nominal.
- No manipule el motor durante el autoajuste.

Si no se respetan estas instrucciones, se producirán lesiones graves o incluso la muerte.

**⚠ PELIGRO**

**FUNCIONAMIENTO INADECUADO DEL EQUIPO**

- Los parámetros nominales del motor **UnS, FrS, nCr, nSP, nPr** y **CD5** deben configurarse correctamente antes de iniciar el autoajuste.
- Si uno o más de estos parámetros se modifican después de que se haya realizado el autoajuste, **tUn** volverá a **nD** y deberá repetirse el proceso.

Si no se respetan estas instrucciones, se producirán lesiones graves o incluso la muerte.

## 8 Ajuste de los parámetros básicos

Menú	Código	Descripción	Ajuste de fábrica	Ajuste de cliente
<b>SEt-</b> [AJUSTES]	<b>ACC</b>	[Aceleración]: Tiempo de aceleración (s)	<b>3.0</b>	
	<b>DEC</b>	[Deceleración]: Tiempo de deceleración (s)	<b>3.0</b>	
	<b>LSP</b>	[Velocidad mínima]: Frecuencia del motor con referencia mínima (Hz)	<b>0.0</b>	
	<b>HSP</b>	[Vel. máxima]: Frecuencia del motor con referencia máxima (Hz)	<b>50.0</b>	
	<b>IEH</b>	[I térmica motor]: Corriente nominal indicada en la placa de características del motor (A)	Calibre del variador	
<b>I-D-</b> [ENTRADAS/SALIDAS]	<b>rrS</b>	[Asig. marcha atrás]: Asignación de marcha atrás	<b>L12</b>	
<b>FUn-&gt;PSS-</b> [VEL. PRESELECC.]	<b>P52</b>	[2 vel. preselecc]: Velocidades preseleccionadas	<b>L13</b>	
	<b>P54</b>	[4 vel. preselecc]: Velocidades preseleccionadas	<b>L14</b>	
<b>FUn-&gt;SAI-</b> [ENTRADAS SUMATORIAS]	<b>SA2</b>	[Ref. sumat. 2] Entrada analógica	<b>A12</b>	

## 9 Ajuste de los parámetros de control

Menú	Código	Descripción	5.1 [Configuración Remoto]	5.2 [Configuración Local]	Ajuste de cliente
<b>CEL-</b> [CONTROL]	<b>Fr1</b>	[Canal Ref. 1]: Control de referencia	<b>A11, A12, A13</b>	<b>A1U1</b>	
<b>I-D-</b> [ENTRADAS/SALIDAS]	<b>CC</b>	[Control 2/3 hilos]: Control de comandos	<b>2C</b> : 2 hilos <b>3C</b> : 3 hilos	<b>L0C</b>	

91 [Configuración Remoto]  
(Configuración de los ajustes de fábrica)

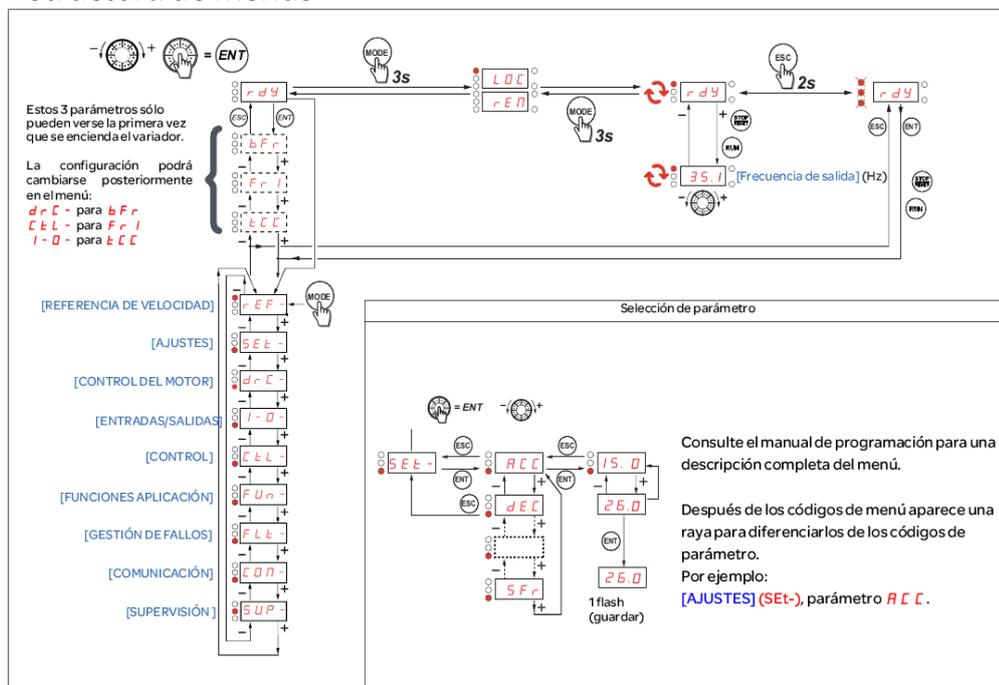
Parámetros predeterminados de fábrica:  
**Fr1 = A11**  
**CC = 2C**

92 [Configuración Local]



## 10 Arranque del motor

### Estructura de menús



### Capacidad de cortocircuito y protección del circuito de derivación



Referencia	Tensión (Y)		Corriente de entrada asignada (1)		Poder de corte a la salida (X)(2)	Intensidad máxima de cortocircuito soportable (3) (Tipo 1)	Protección del circuito de derivación (Z1)	Calibre (Z2)
	V	kA	kA	kA	kA	kA	A	
ATV312HD18M2	200-240	1	22	22	7	Fusible de clase J	6	
ATV312HD37M2	200-240	1	22	22	7	Fusible de clase J	10	
ATV312HD55M2	200-240	1	22	22	7	Fusible de clase J	10	
ATV312HD75M2	200-240	1	22	22	7	Fusible de clase J	15	
ATV312HU11M2	200-240	1	22	22	7	Fusible de clase J	20	
ATV312HU15M2	200-240	1	22	22	7	Fusible de clase J	20	
ATV312HU22M2	200-240	1	22	22	7	Fusible de clase J	30	
ATV312HD18M3	200-240	5	22	22	22	Fusible de clase J	3	
ATV312HD37M3	200-240	5	22	22	22	Fusible de clase J	6	
ATV312HD55M3	200-240	5	22	22	22	Fusible de clase J	10	
ATV312HD75M3	200-240	5	22	22	22	Fusible de clase J	10	
ATV312HU11M3	200-240	5	22	22	22	Fusible de clase J	15	
ATV312HU15M3	200-240	5	22	22	22	Fusible de clase J	15	
ATV312HU22M3	200-240	5	22	22	22	Fusible de clase J	20	
ATV312HU30M3	200-240	5	22	22	22	Fusible de clase J	25	
ATV312HU40M3	200-240	5	22	22	22	Fusible de clase J	35	
ATV312HU55M3	200-240	22	22	22	22	Fusible de clase J	50	
ATV312HU75M3	200-240	22	22	22	22	Fusible de clase J	60	
ATV312HD11M3	200-240	22	22	22	22	Fusible de clase J	80	
ATV312HD15M3	200-240	22	22	22	22	Fusible de clase J	110	
ATV312HD37N4	380-500	5	22	100	100	Fusible de clase J	3	
ATV312HD55N4	380-500	5	22	100	100	Fusible de clase J	6	
ATV312HD75N4	380-500	5	22	100	100	Fusible de clase J	6	
ATV312HU11N4	380-500	5	22	100	100	Fusible de clase J	10	
ATV312HU15N4	380-500	5	22	100	100	Fusible de clase J	10	
ATV312HU22N4	380-500	5	22	100	100	Fusible de clase J	15	
ATV312HU30N4	380-500	5	22	100	100	Fusible de clase J	15	
ATV312HU40N4	380-500	5	22	100	100	Fusible de clase J	20	
ATV312HU55N4	380-500	22	22	100	100	Fusible de clase J	30	
ATV312HU75N4	380-500	22	22	100	100	Fusible de clase J	35	
ATV312HD11N4	380-500	22	22	100	100	Fusible de clase J	50	
ATV312HD15N4	380-500	22	22	100	100	Fusible de clase J	70	
ATV312HD75S6	525-600	5	22	22	22	Fusible de clase J	6	
ATV312HU15S6	525-600	5	22	22	22	Fusible de clase J	6	
ATV312HU22S6	525-600	5	22	22	22	Fusible de clase J	10	
ATV312HU40S6	525-600	5	22	22	22	Fusible de clase J	15	
ATV312HU55S6	525-600	22	22	22	22	Fusible de clase J	20	
ATV312HU75S6	525-600	22	22	22	22	Fusible de clase J	25	
ATV312HD11S6	525-600	22	22	22	22	Fusible de clase J	35	
ATV312HD15S6	525-600	22	22	22	22	Fusible de clase J	45	

Calibres de los fusibles recomendados para requisitos UL y CSA. Componentes para ser utilizados según la norma UL508.

Adecuado para circuitos capaces de proporcionar un máximo de \_\_\_X\_\_\_ amperios simétricos rms, para una tensión máxima de \_\_\_Y\_\_\_ voltios, cuando se proteja por \_\_\_Z1\_\_\_ con una capacidad máxima de \_\_\_Z2\_\_\_.

(1) La corriente de entrada asignada es por la cual el producto ha sido diseñado térmicamente. La instalación en una alimentación superior a este nivel requerirá una inductancia adicional para satisfacer dicho nivel.

(2) El poder de corte a la salida se basa en la protección de cortocircuito estático integral. Esto no proporciona protección de los circuitos de derivación. La protección de los circuitos de derivación debe proporcionarse de acuerdo con el Código nacional de electricidad de EE. UU. y con cualquier código local adicional. Esto depende del tipo de instalación.

(3) La intensidad máxima de cortocircuito soportable es la intensidad máxima de cortocircuito presente en los terminales de entrada del variador con la protección de circuito de derivación específica para la que la avería de cualquier componente interno no producirá un peligro de descarga eléctrica, llama, fuego o explosión en el exterior de una estructura específica de cofre. Las distintas combinaciones están indicadas en documentos adicionales.

## Encoder

## Rotary Measuring Technology Incremental encoders



### Economy Type 5810 (shaft)



- ø 58 mm housing
- Short-circuit proof outputs
- Customized versions also available
- High mechanical protection
- Push-pull output  
(10 ... 30 V supply voltage)



Incremental Encoders

#### Mechanical characteristics:

Speed:	max. 6000 min <sup>-1</sup>
Rotor moment of inertia:	approx. 0.6 x 10 <sup>-6</sup> kgm <sup>2</sup>
Starting torque:	< 0.01 Nm
Radial load capacity of shaft:	40 N
Axial load capacity of shaft:	20 N
Weight:	approx. 0.4 kg
Protection acc. to EN 60 529:	IP 64
	Housing (IP 67 with cable, IP 50 with connector)
Working temperature:	0° C ... +65 °C
Shaft:	stainless steel
Shock resistance acc. to DIN-IEC 68-2-27	1000 m/s <sup>2</sup> , 6 m
Vibration resistance acc. to DIN-IEC 68-2-6:	100 m/s <sup>2</sup> , 10..2000 Hz

#### Electrical characteristics:

Output circuit:	Push-pull
Supply voltage:	10 ... 30 V DC
Power consumption (no load)	
without inverted signal:	max. 80 mA
Permissible load/channel:	max. ±30 mA
Pulse frequency:	max. 20 kHz
Signal level high:	min. U <sub>B</sub> - 2.5 V
Signal level low:	max. 1.5V
Rise time t <sub>r</sub>	max. 1 µs
Fall time t <sub>f</sub>	max. 1 µs
Short circuit proof outputs: <sup>1)</sup>	yes
Reverse connection protection at UB:	yes
Conforms to CE requirements acc. to EN 61000-6-2, EN 61000-6-4 and EN 61000-6-3	
RoHS compliant acc. to EU guideline 2002/95/EG	

<sup>1)</sup> If supply voltage correctly applied

#### Terminal assignment

Signal:	0 V	+U <sub>B</sub>	A	B	0 or 0̄	Shield
5 pin plug, Pin:	1	2	3	4	5	PH <sup>1)</sup>
Colour	WH	BN	GN	YE	GY	

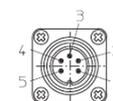
<sup>1)</sup> PH = Shield is attached to connector housing

Isolate unused outputs before initial startup.

#### Top view of mating side, male contact

##### base:

5-pin plug



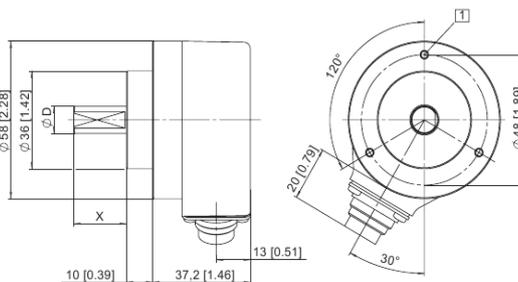
## Rotary Measuring Technology Incremental encoders



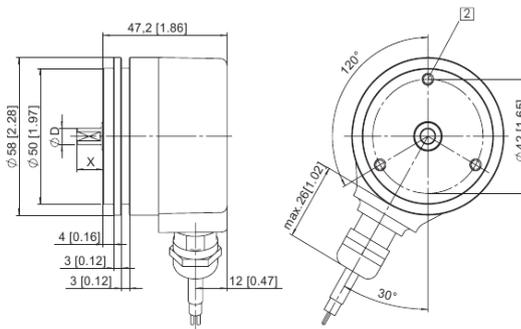
### Economy Type 5810 (shaft)

#### Dimensions

Clamping flange  $\varnothing 58$



Synchronous flange  $\varnothing 58$



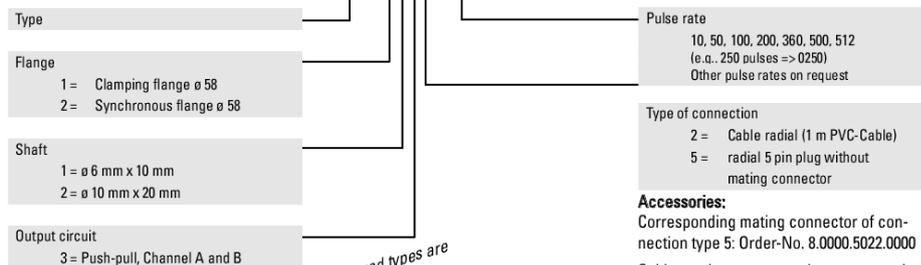
- 1 3xM3, 6 [0,24] deep
- 2 3xM4, 6 [0,24] deep

#### Mounting advice:

The flanges and shafts of the encoder and drive should not both be rigidly coupled together at the same time! We recommend the use of suitable couplings (see Accessories section).

#### Order code:

8.5810.XXXX.XXXX



*Preferred types are indicated in bold*

#### Accessories:

Corresponding mating connector of connection type 5: Order-No. 8.0000.5022.0000

Cables and connectors, also pre-assembled, can be found in the chapter Connection Technology

Mounting attachments and couplings can be found in the chapter Accessories

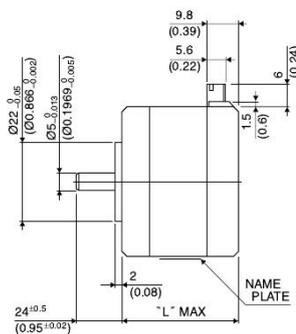
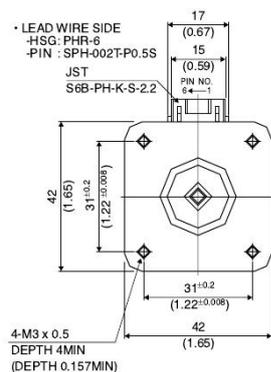
## Motor de paso

42□ 1.8°

17PM-K

1.8°

### ■ 外観図 Outline



Hybrid

UNIT: mm (inch)

	"L"
17PM-K7**	26 (1.02)
17PM-K2**	30 (1.18)
17PM-K0**	34 (1.34)
17PM-K3**	38 (1.50)
17PM-K1**	42 (1.65)
17PM-K4**	48 (1.89)

結線表 PIN NO. vs. PHASE

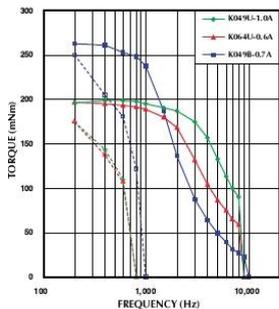
相 (PHASE)	A	A COM	$\bar{A}$	B	B COM	$\bar{B}$
ピン番号 (PIN NO.)	4	5	6	3	2	1

### ■ 仕様 Specifications

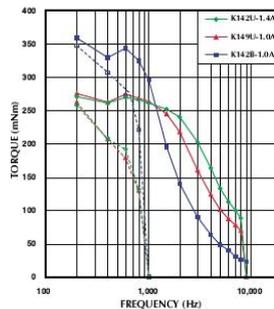
型式	ステップ角	ドライブ方式	定格電流	巻線抵抗	ホールディングトルク	インダクタンス	ロータイナーシャ	ディテントトルク	質量
Model	Step Angle	Drive Sequence	Rated Current	Resistance	Holding Torque	Inductance	Rotor Inertia	Detent Torque	Mass
	(deg)		(A)	(Ohms)	(mNm)	(mH)	(g·cm <sup>2</sup> )	(mNm)	(g)
17PM-K049U	1.8	UNI-POLAR	1	3.1	200	3.2	37	10.8	200
17PM-K064U	1.8	UNI-POLAR	0.6	8.3	200	8.1	37	10.8	200
17PM-K142U	1.8	UNI-POLAR	1.4	2.3	280	3.2	62	11.8	300
17PM-K149U	1.8	UNI-POLAR	1	4.3	280	6.0	62	11.8	300
17PM-K249U	1.8	UNI-POLAR	0.8	2.7	100	3.0	24	4.3	180
17PM-K264U	1.8	UNI-POLAR	0.6	6.9	100	7.4	24	4.3	180
17PM-K342U	1.8	UNI-POLAR	1.4	2.0	250	2.5	50	11.3	250
17PM-K349U	1.8	UNI-POLAR	1	3.6	250	4.7	50	11.3	250
17PM-K442U	1.8	UNI-POLAR	1.4	2.8	400	3.4	75	16.7	350
17PM-K449U	1.8	UNI-POLAR	1	4.9	400	6.5	75	16.7	350
17PM-K749U	1.8	UNI-POLAR	0.9	2.2	50	0.4	11	2.8	150
17PM-K764U	1.8	UNI-POLAR	0.6	5.6	50	1.0	11	2.8	150
17PM-K049B	1.8	BI-POLAR	0.7	6.2	270	12.8	37	10.8	200
17PM-K142B	1.8	BI-POLAR	1	4.6	380	12.9	62	11.8	300
17PM-K249B	1.8	BI-POLAR	0.6	5.4	140	12.0	24	4.3	180
17PM-K342B	1.8	BI-POLAR	0.9	4.0	310	9.9	50	11.3	250
17PM-K442B	1.8	BI-POLAR	0.9	5.6	500	13.6	75	16.7	350
17PM-K749B	1.8	BI-POLAR	0.6	4.4	65	1.6	11	2.8	150

■ トルク・スピード特性 Torque/Speed Characteristics

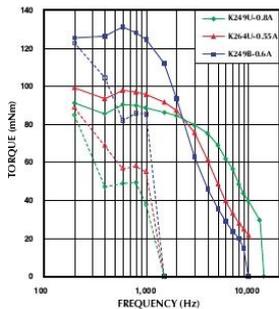
Model No: 17PM-K049U,K064U,K049B  
Driver: Chopper Dual  
Supply Voltage: 24.0 (Volt)



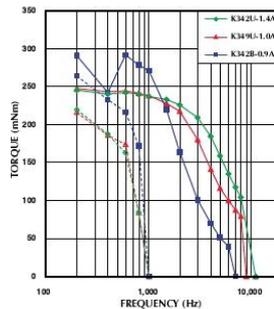
Model No: 17PM-K142U,K149U,K142B  
Driver: Chopper Dual  
Supply Voltage: 24.0 (Volt)



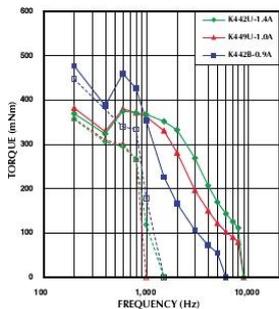
Model No: 17PM-K249U,K264U,K249B  
Driver: Chopper Dual  
Supply Voltage: 24.0 (Volt)



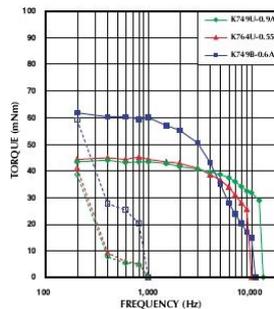
Model No: 17PM-K342U,K349U,K342B  
Driver: Chopper Dual  
Supply Voltage: 24.0 (Volt)



Model No: 17PM-K442U,K449U,K442B  
Driver: Chopper Dual  
Supply Voltage: 24.0 (Volt)



Model No: 17PM-K749U,K764U,K749B  
Driver: Chopper Dual  
Supply Voltage: 24.0 (Volt)



— : PULL OUT  
- - - : PULL IN

Diagrama esquemático del amplificador de corriente

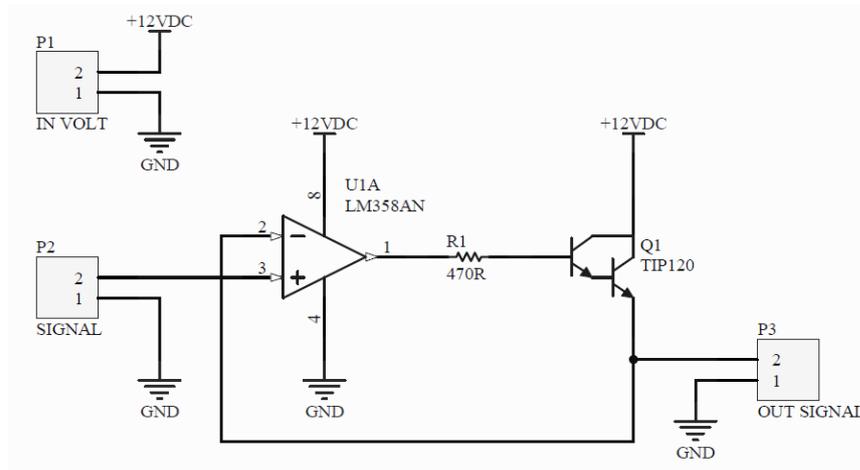
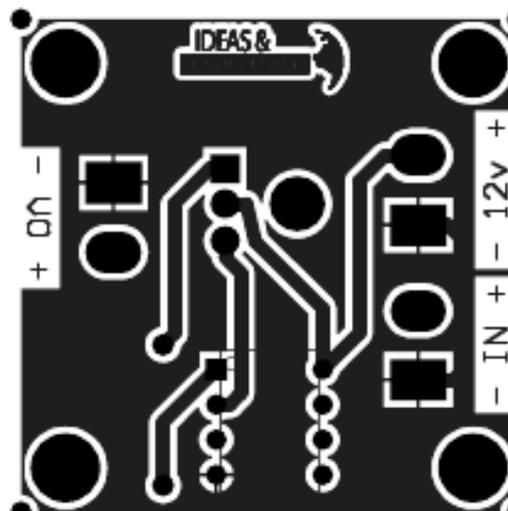


Diagrama PCB del amplificador de corriente



### Diagrama esquemático del driver motor de paso

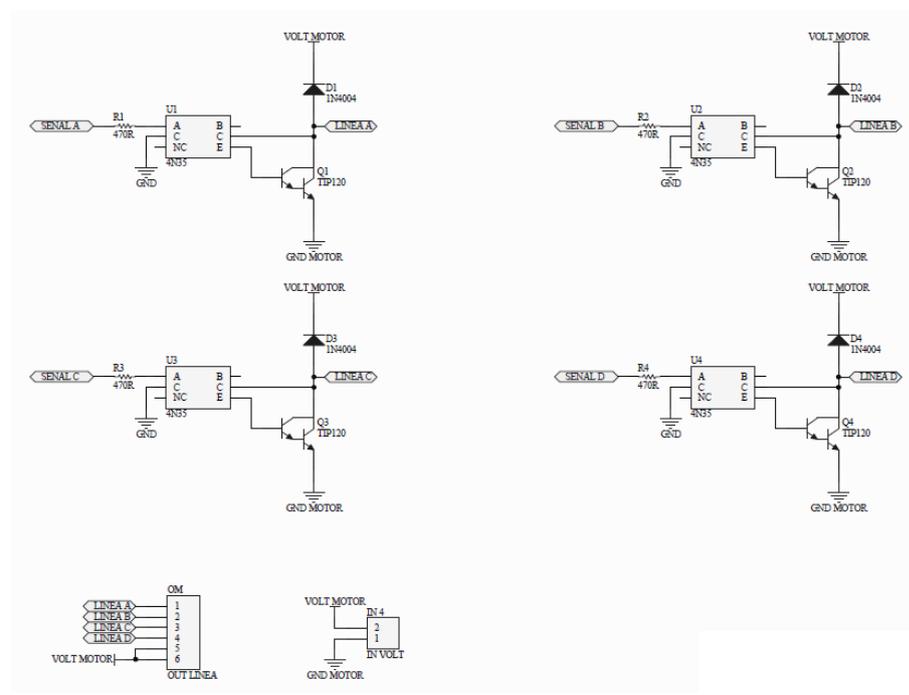
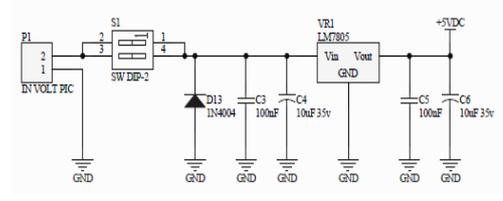
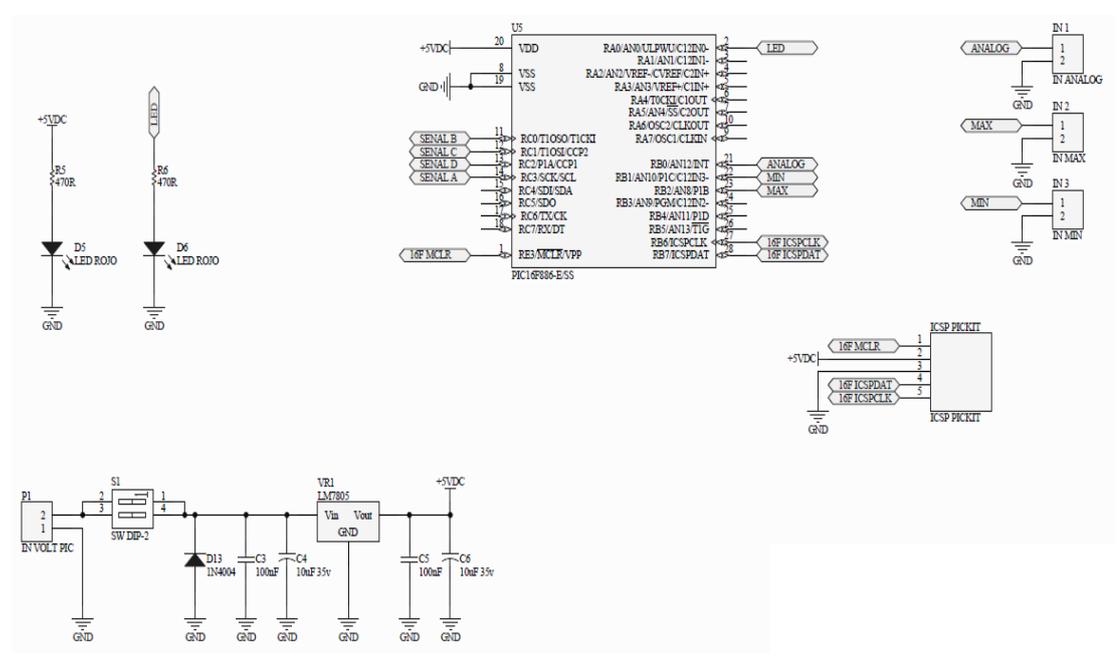
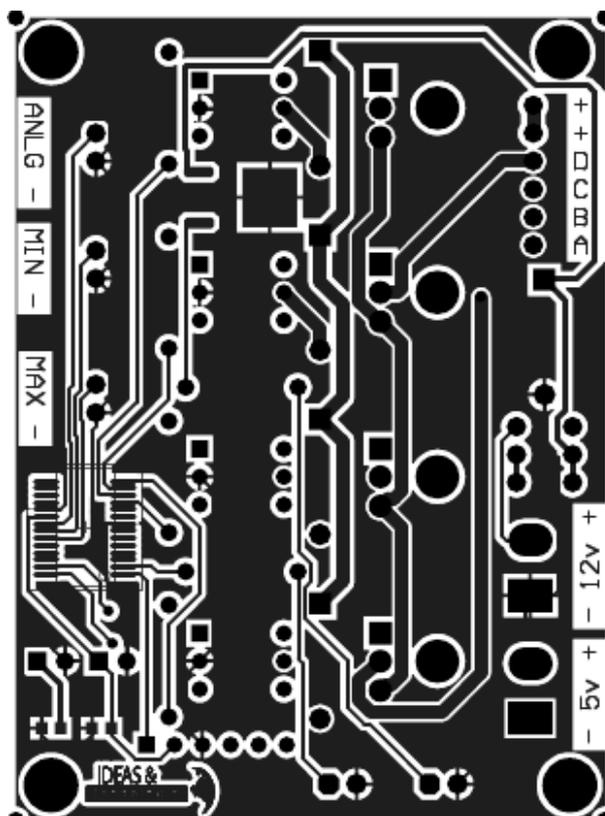


Diagrama PCB del driver motor de paso



## ANEXO D: CÓDIGO DEL DRIVER DEL MOTOR DE PASO

```

programControlador_Codigo

SYMBOL MIN=PORTB.1

SYMBOL MAX=PORTB.2

dim vueltas,MUESTRAS,analog,TEMP_ANALOG as word

dim paso_bobina,i,INCREM,DECREM,FLAG,FLAG2 as byte

DIM voltaje_I,voltaje_F ,DIFER AS float

DIM TXT AS string[23]

'***** Declaracion de procedimientos *****

sub procedureled ()

    porta.0=1

    delay_ms(200)

    porta.0=0

    delay_ms(200)

    porta.0=1

    delay_ms(200)

end sub

sub procedure Giro1 ()

PORTC=paso_bobina

VDelay_ms(50)

    if (paso_bobina.3=1) then

paso_bobina= paso_bobina<< 1

paso_bobina=1

```

```
else
paso_bobina= paso_bobina<< 1
end if
end sub
sub procedure Giro2 ()
PORTC=paso_bobina
VDelay_ms(50)
  if (paso_bobina.0=1) then
paso_bobina= paso_bobina>> 1
paso_bobina=8
else
paso_bobina= paso_bobina>>1
end if
end sub
'***** Programa principal main *****
main:
  OPTION_REG=0
  INTCON=0
  ' Configuracion de Puertos analogicos / digitales AN0 - AN13
  ANSEL = %00000000          'REGISTRO CONFIG. 0 DIGITAL, 1
ANALOGICO
  ANSELH = %00010000        'REGISTRO CONFIG. 0 DIGITAL, 1
ANALOGICO
  ' Configuracion de Puertos como entradas / salidas
```

```
trisa = %00000000      ' Configuracion IN/OUT PORTA
trisc = %00000000      ' Configuracion IN/OUT PORTB
trisb = %00000111      ' Configuracion IN/OUT PORTC
TRISE=0

WPUB = %00000110
' Reset de salidas
PORTA = %00000000      ' Inicializacion PORTA
PORTB = %00000000      ' Inicializacion PORTB
PORTC = %00000000      ' Inicializacion PORTC
led()
paso_bobina=1
VUELTAS=0
voltaje_I=0
voltaje_F =0
INCREM=0
DECREM=0
FLAG=0
FLAG2=0
MUESTRAS=0
TEMP_ANALOG=0
do
    GIRO2 ()
loop until (Min=0)
Delay_ms (200)
```

```

' analog=Adc_Read(12) '0->0 5v>1023
' voltaje_I=((analog/1023)*5)
  LED()
' LazoinfinitoBucle While
while (true)
  DO
    analog = Adc_Read(12)
  Delay_ms(10)
    TEMP_ANALOG= ANALOG + TEMP_ANALOG
  INC(MUESTRAS)
    LOOP UNTIL (MUESTRAS>=50)

analog=TEMP_ANALOG/50

voltaje_F =((analog /1023)*5)

    IF(voltaje_F>voltaje_I + 0.2 ) THEN
  DIFER = (voltaje_F - voltaje_I)
  INCREM=1
    FLAG=0
    FLAG2=0
  paso_bobina=1
  voltaje_I = voltaje_F
ELSE
    IF(voltaje_F + 0.2 <voltaje_I ) THEN
  DIFER = (voltaje_I - voltaje_F )

```

```
DECREM=1

        FLAG=0

        FLAG2=0

paso_bobina=8

voltaje_I = voltaje_F

        END IF

        END IF

VUELTAS = (34*DIFER)

IF((voltaje_F>4.9) AND (FLAG=0)) THEN

    do

        GIRO1()

    loop until (MAX=0)

    INCREM =0

    DIFER=0

    FLAG=1

ELSE

IF((voltaje_F<0.2) AND (FLAG2=0)) THEN

    do

        GIRO2()

    loop until (Min=0)

    DECREM =0

    DIFER=0

    FLAG2=1
```

```
END IF

END IF

IF(INCREM=1) THEN
  for i=0 to vueltas
    Giro1 ()
  next i
  INCREM=0
ELSE
  IF(DECREM=1) THEN
    for i=0 to vueltas
      Giro2 ()
    next i
    DECREM=0
  END IF
END IF

TEMP_ANALOG =0

MUESTRAS=0

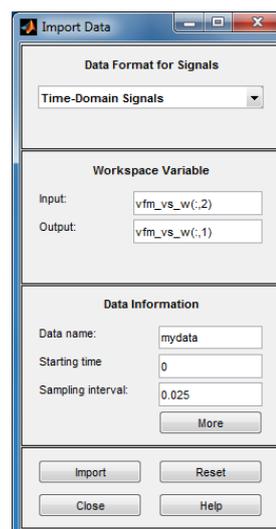
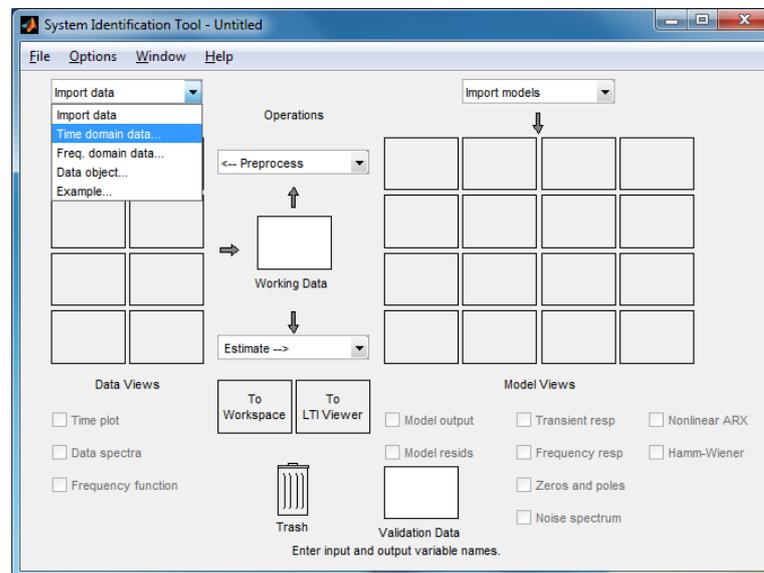
wend

end.
```

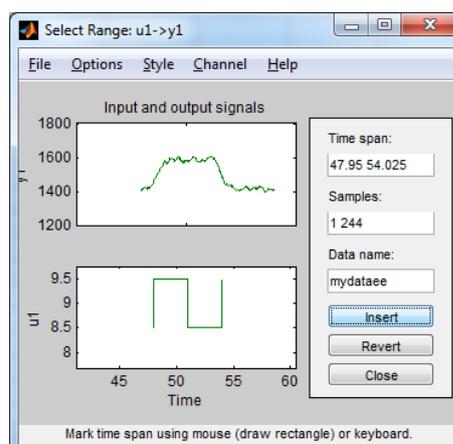
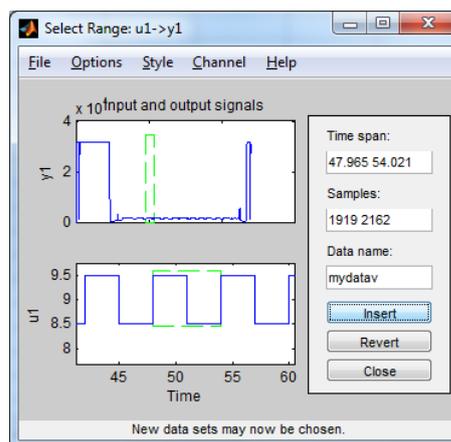
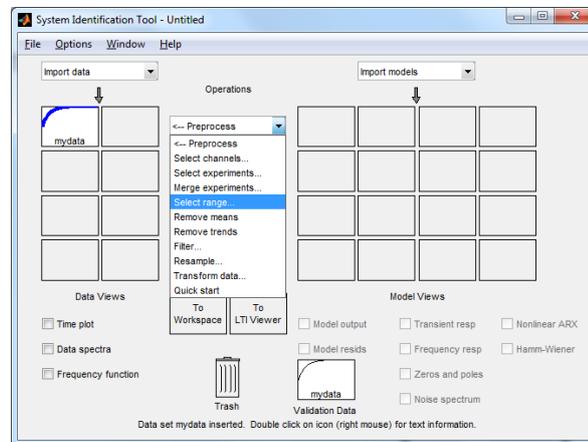
## Anexo E. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE

Función de transferencia velocidad vs voltaje variador de frecuencia

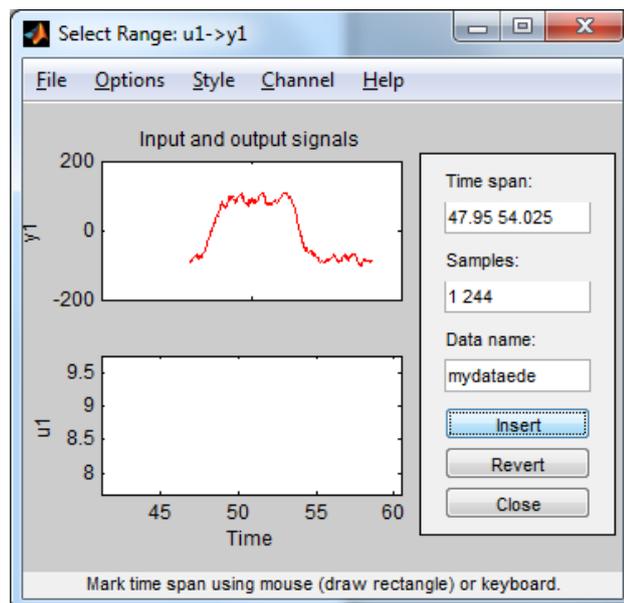
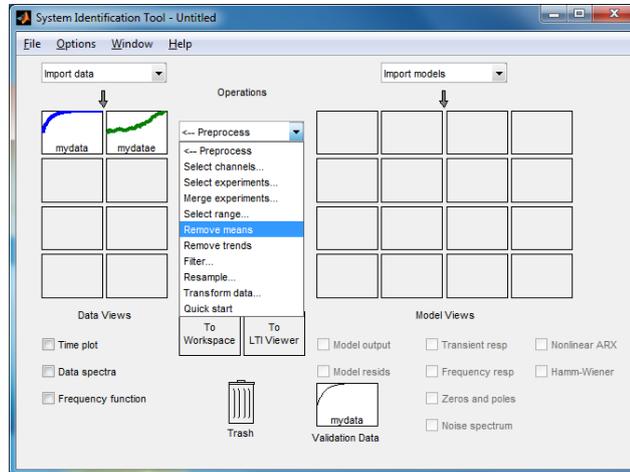
1. Ingresar el comando ident en el comandWindow de matlab e importar los datos



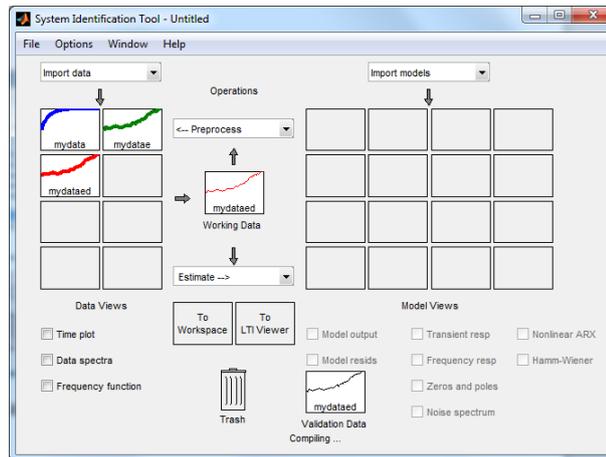
## 2. Seleccionar rango o datos a usar en la identificación



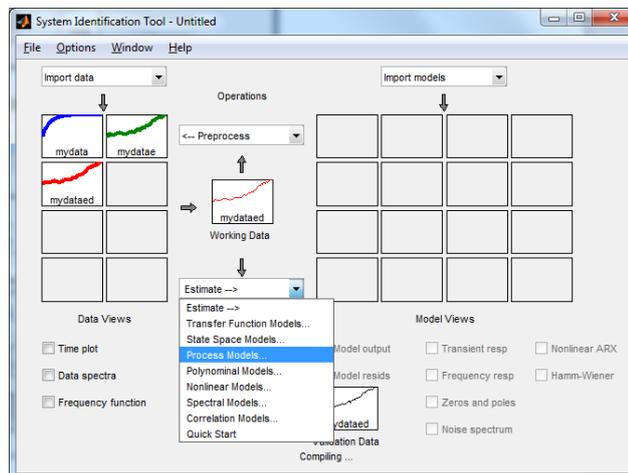
### 3. Remover el promedio



## 4. arrastrar la nueva ventana a Working Data y validation Data



## 5. Escoger el algoritmo a usar para realizar la estimación



## 6. Elegir el modelo de función de transferencia a estimar

Process Models

Model Transfer Function

$$\frac{K}{(1 + T_{p1} s)}$$

Poles

1 All real

0

1

2

3

Integrator

Parameter	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>		Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>		Auto	[0 Inf]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 0.75]

Initial Guess

Auto-selected

From existing model:

User-defined:  Value-->Initial Guess

Disturbance Model: None

Initial condition: Auto

Focus: Simulation

Covariance: Estimate

Display progress

Name: P1

Estimate Close Help

Process Models

Model Transfer Function

$$\frac{K}{(1 + T_{p1} s)(1 + T_{p2} s)}$$

Poles

2 All real

Zero

Delay

Integrator

Parameter	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	182.6549	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	0.45805	Auto	[0 10000]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0.41631	Auto	[0 10000]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]

Initial Guess

Auto-selected

From existing model:

User-defined:  Value-->Initial Guess

Disturbance Model: None

Initial condition: Auto

Focus: Simulation

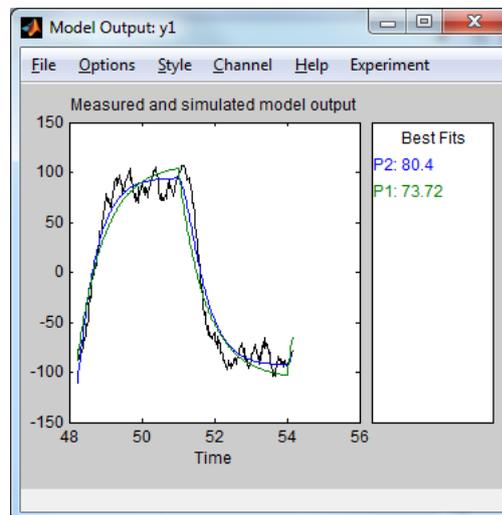
Covariance: Estimate

Display progress

Name: P2

Estimate Close Help

7. Escoger el modelo con porcentaje de aproximación más alto y arrastrarlo al workspace

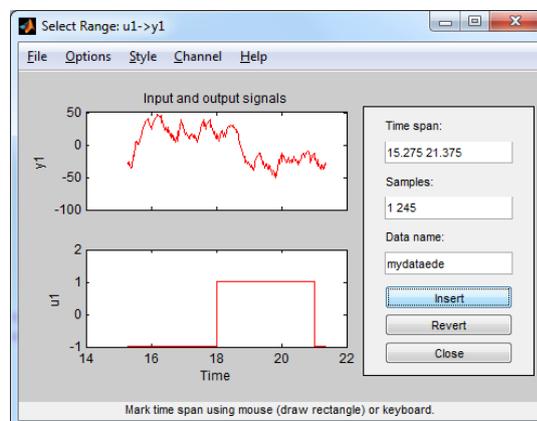
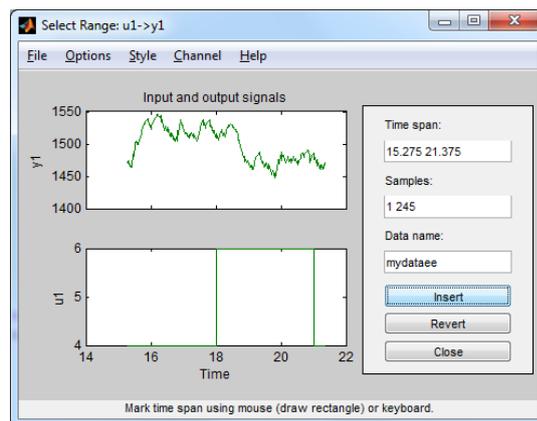
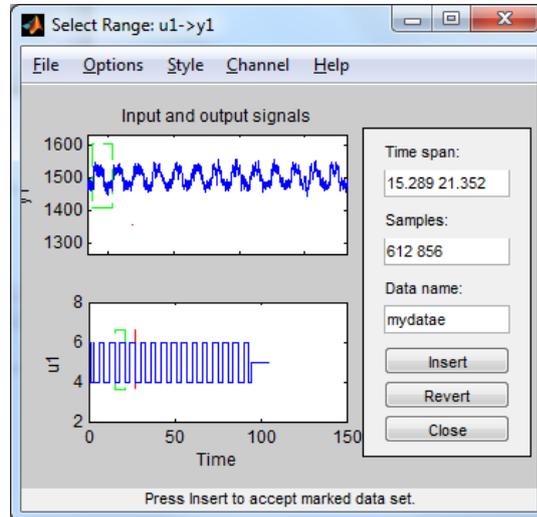


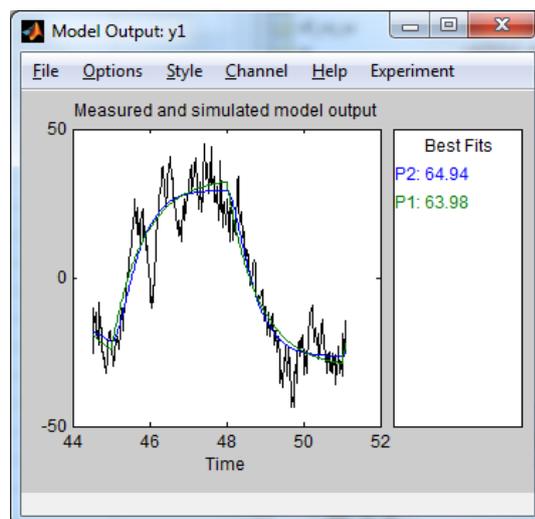
8. Función de transferencia

$$\frac{\omega}{V_f} = \frac{1676.2553}{(s + 3.035)(s + 3.008)}$$

El procedimiento usado para la obtención de las próximas funciones de transferencias es el mismo, por tal motivo solo se va a presentar los datos más importantes.

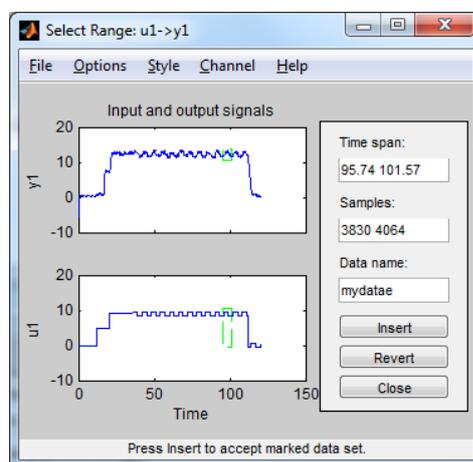
## Función de transferencia velocidad vs voltaje campo del alternador

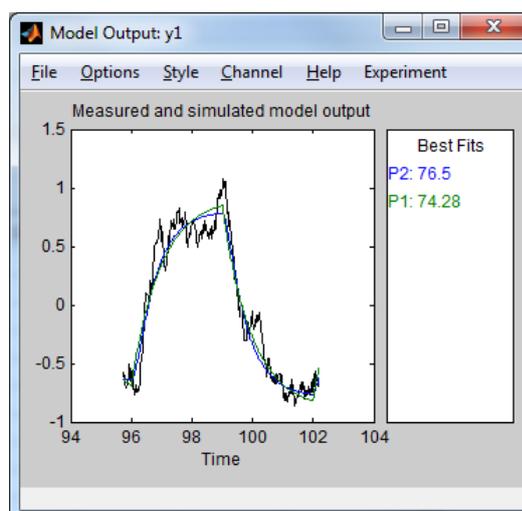
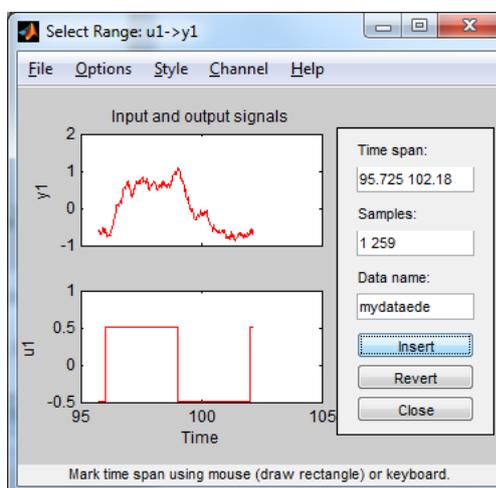
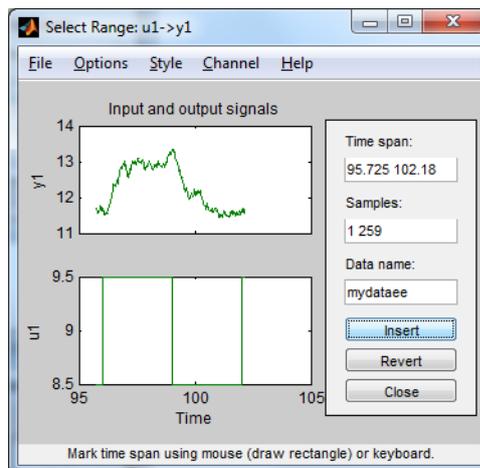




$$\frac{\omega}{V_{fg}} = \frac{-314.7891}{(s + 4.066)(s + 3.069)}$$

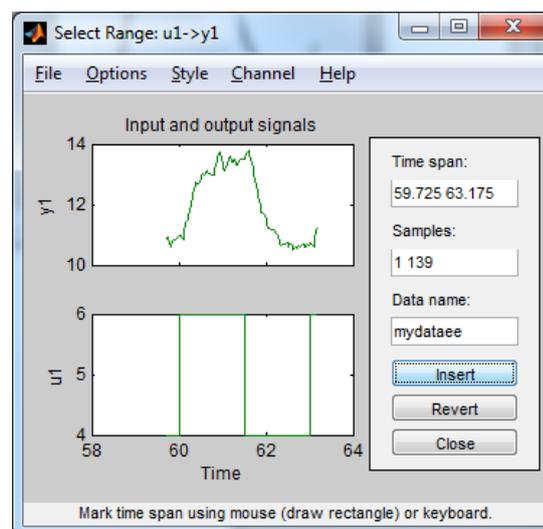
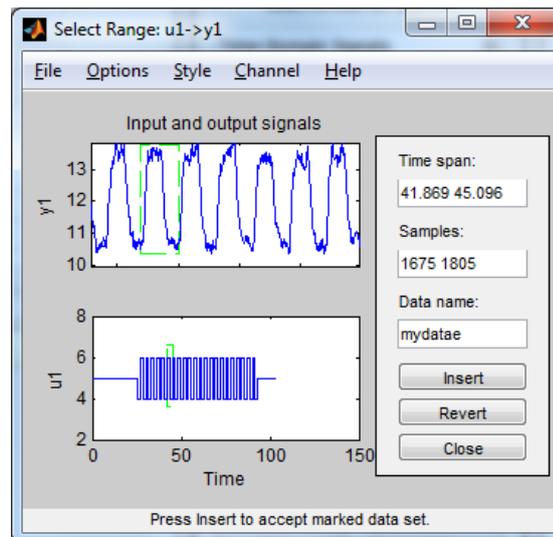
Función de transferencia voltaje de salida vs voltaje campo del variador de frecuencia

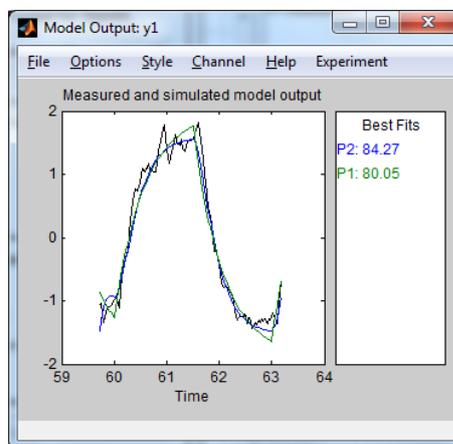
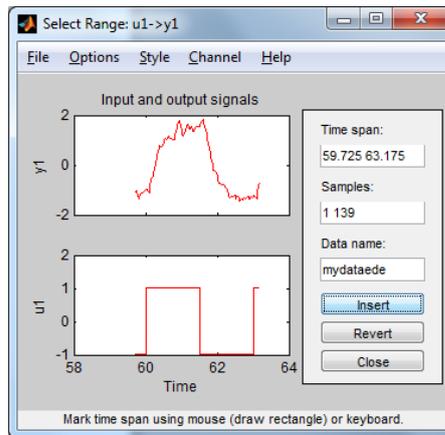




$$\frac{V_a}{V_f} = \frac{18.7866}{(s + 4.237)(s + 3.515)}$$

Función de transferencia voltaje de salida vs voltaje campo del alternador





$$\frac{V_a}{V_{fg}} = \frac{54.4212}{(s + 5.976)(s + 5.975)}$$

## ANEXO F.PRÁCTICA DE LABORATORIO

### Pre-práctica

#### CONTROL DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE

##### **Introducción:**

En las centrales de generación eléctrica es de vital importancia realizar dos tipos de control. El primero es el control automático de generación AVC, que consiste en realizar el control carga frecuencia LFC, que mantiene la frecuencia del sistema en los valores programados, y el despacho económico. El segundo es el control AVR conocido como control regulador de voltaje, con la finalidad de mantener la magnitud del voltaje del sistema a un nivel específico. En lo mencionado anteriormente se puede visualizar la importancia que tienen ambos tipos de control en los sistemas de potencia.

El sistema frecuencia-voltaje es una central de generación eléctrica a escala, donde se puede aplicar técnicas de control automático para realizar el control LFC y AVR. Para realizar el control del sistema en esta práctica, se implementa como técnica de control, el control por variables de estados, por el método de reubicación de polos del modelo interno. Además se utiliza otras técnicas de control, como el desacoplamiento de las variables de interés y el desarrollo de observadores para estimar los estados del sistema que no son medibles.

**Objetivos:**

- Obtener y simular el DESACOPLADOR para un sistema multivariable de dos entradas y dos salidas.
- Obtener y simular los controladores del sistema desacoplado por el método de variables de estado usando el modelo interno.

**Teoría****TEORÍA DEL DESACOPLADOR**

Cuando se realiza la reubicación de los polos del sistema frecuencia voltaje no se puede determinar cómo se ve afectada la dinámica de cada salida en particular. La ventaja que se obtiene al desacoplar el sistema frecuencia-voltaje consiste en que se va a trabajar en dos sistemas totalmente independientes, el sistema frecuencia y el sistema voltaje, en los cuales se puede saber la dinámica de cada variable de salida al realizar la reubicación de los polos.

La forma más simple de representar al sistema frecuencia-voltaje es la que se muestra en la figura 1. Los bloques G representan los bloques de la ganancia dinámica obtenidos en la identificación del sistema, se puede observar claramente el acoplamiento que existe entre ambas entradas, una

variación en cualesquiera de las dos entrada produce una variación en ambas salidas.[35]

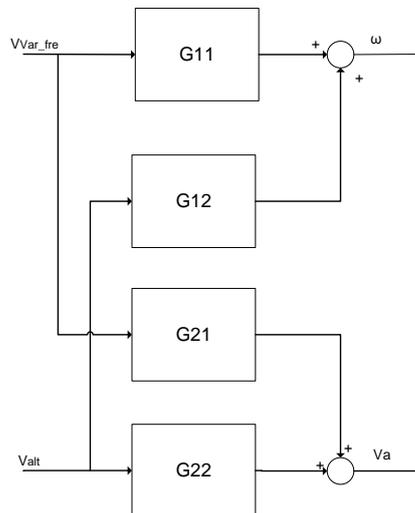


Figura 1

Dónde:

$$G_{11} = \frac{\omega}{V_{var\_fre}} = \frac{K_{11}}{(s/p_1 + 1)(s/p_2 + 1)}, G_{12} = \frac{\omega}{V_{alt}} = \frac{K_{12}}{(s/p_3 + 1)(s/p_4 + 1)},$$

$$G_{21} = \frac{V_a}{V_{var\_fre}} = \frac{K_{21}}{(s/p_5 + 1)(s/p_6 + 1)}, G_{22} = \frac{V_a}{V_{alt}} = \frac{K_{22}}{(s/p_7 + 1)(s/p_8 + 1)}$$

Ecuación 1 Funciones de transferencia del sistema frecuencia-voltaje

---

[35] Interacción en sistemas multivariables: texto guía. Maestría en automatización y control industrial (MACI)-control multivariable- 56p.

Los valores  $K_{11}$ ,  $K_{12}$ ,  $K_{21}$ ,  $K_{22}$  de la ecuación 4.15 se denominan ganancias de estado estacionario de circuito abierto.

El objetivo es transformar un sistema MIMO en varios sistemas SISO, para realizar esto se necesita determinar que variable de entrada o manipulada controla una variable de salida en particular.

Para determinar los pares de variables manipuladas y controladas, se crea la matriz de ganancias relativas  $\mu$  que tiene la forma de la ecuación 2.

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} \\ \mu_{21} & \mu_{22} \end{bmatrix}$$

Ecuación 2 Matriz de ganancias relativas para un sistema de dos entradas y dos salidas

Los valores de cada uno de los elementos de la matriz de ganancias relativas están expresados en la ecuación 3

$$\mu_{11} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}, \quad \mu_{12} = \frac{-K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

$$\mu_{21} = \frac{-K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}, \quad \mu_{22} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

Ecuación 3 Valores de los elementos de la Matriz de ganancias relativas para un sistema de dos entradas y dos salidas.

La matriz de ganancias relativas es una herramienta muy importante en el análisis de sistemas multivariables. No es solamente una herramienta importante en la selección de pares de variables manipuladas y

controladas, sino que también ha sido utilizada para predecir el comportamiento de respuestas controladas.

Para saber si el sistema MIMO frecuencia-voltaje puede transformarse en dos sistemas SISO, el sistema frecuencia y el sistema voltaje. Los valores de la diagonal principal de la matriz de ganancia relativa deben ser próximos a uno y los demás valores próximos a cero pero no negativos.

El compensador que realiza la tarea de desacoplamiento, se conoce con el nombre de desacoplador y su diagrama se muestra en la figura 2

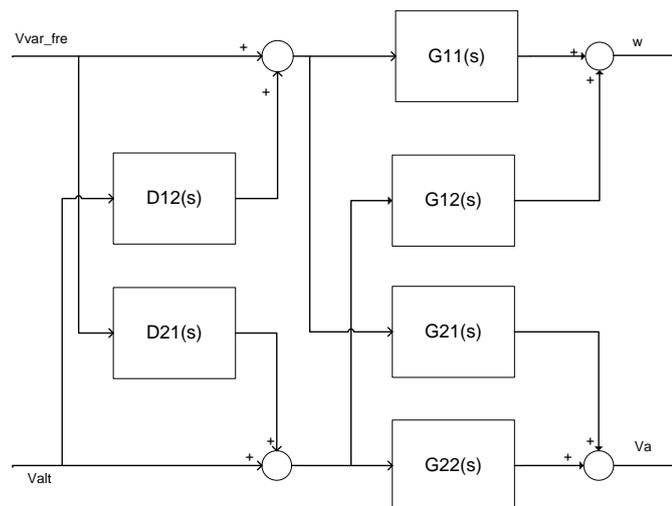


Figura 2 Diagrama de bloques del desacoplador.

Se pretende que D12 cancele el efecto que se produce en  $\omega$  cuando se produce un cambio en Valt y que D21 cancele el efecto que se produce en

Va cuando se produce un cambio en  $V_{var\_fre}$ . Del diagrama de bloques de la figura 2 se obtienen las siguientes ecuaciones. [36]

$$\frac{\omega(s)}{v_{alt}(s)} = D_{12}(s)G_{11}(s) + G_{12}(s) = 0$$

$$\frac{v_a(s)}{v_{var\_fre}} = D_{21}(s)G_{22}(s) + G_{21}(s) = 0$$

Ecuación 4 Ecuaciones del desacoplador.

Resolviendo el sistema de ecuaciones de la ecuación 4, determinamos las funciones de transferencias de los desacopladores de  $D_{12}$  y  $D_{21}$ .

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)}$$

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)}$$

Ecuación 5 Funciones de transferencia del desacoplador.

REPRESENTACIÓN DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA SISO IDENTIFICADAS EN DIAGRAMA DE FLUJO DE SEÑAL.

Una vez desacoplado el sistema frecuencia-voltaje, la forma de representar el sistema frecuencia y el sistema voltaje en variables de estado es aplicando el siguiente procedimiento a ambos sistema.

Para realizar la representación de la función de transferencia en diagrama de flujo de señal se parte de manera general escribiendo la función de transferencia como

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

Ecuación 6 Función de transferencia en forma general

Donde  $n \geq m$  y todos los coeficientes  $a$  y  $b$  son números reales. Si se multiplica el numerador y el denominador por  $s^{-n}$ , se obtiene:

$$G(s) = \frac{b_m s^{-(n-m)} + b_{m-1} s^{-(n-m+1)} + \dots + b_1 s^{-(n-1)} + b_0 s^{-n}}{1 + a_{n-1} s^{-1} + \dots + a_1 s^{-(n-1)} + a_0 s^{-n}}$$

Ecuación 7 Función de transferencia en forma general multiplicada por  $S^{-n}$

El conocimiento de la fórmula de Mason para la ganancia del grafo del flujo permite reconocer los factores usuales de realimentación en el numerador. La fórmula de Mason del grafo de flujo se escribe como.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\sum_k P_k \Delta_k}{\Delta}$$

Ecuación 8 Ecuación de Mason

Cuando todos los lazos de realimentación se tocan y todas las trayectorias de avance tocan los lazos de realimentación la ecuación 8 se reduce a:

$$G(s) = \frac{\sum_k P_k \Delta_k}{1 - \sum_{q=1}^n L_q} = \frac{\text{suma de los factores de trayectoria de avance}}{1 - \text{suma de los factores de lazos de realimentacion}}$$

#### Ecuación 9 Ecuación de Mason simplificada

El modelo de estado de grafo de flujo de señal que se va a usar es la forma canónica de variable de fase controlable.

Considerando la función de transferencia de cuarto orden como se muestra en la ecuación 10

$$G(s) = \frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{b_3 s^{-1} + b_2 s^{-2} + b_1 s^{-3} + b_0 s^{-4}}{1 + a_3 s^{-1} + a_2 s^{-2} + a_1 s^{-3} + a_0 s^{-4}}$$

#### Ecuación 10 Función de transferencia de cuarto orden

Los términos del numerador representan los factores de la trayectoria de avance en la fórmula de Mason para la ganancia de flujo de señal, las trayectorias de avance deben tocar todos los lazos de realimentación. En la figura 3 se muestra una representación de la ecuación 10, del grafo de flujo de señal en la forma canónica de variable de fase controlable. [37]

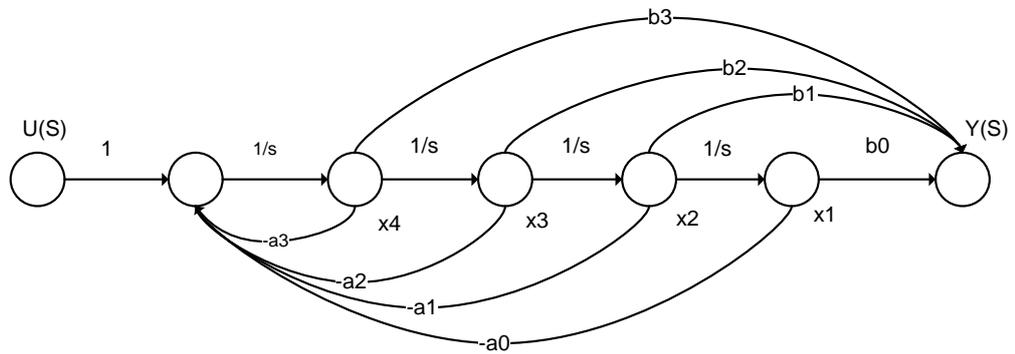


Figura 3 Función de transferencia de cuarto orden expresado en variables de fase.

La representación en variables de estado es obtenida por medio del diagrama de flujo de la figura 3.

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3, \dot{x}_3 = x_4, \dot{x}_4 = a_0x_1 + a_1x_2 + a_2x_3 + a_3x_4$$

$$y = b_0x_1 + b_1x_2 + b_2x_3 + b_3x_4$$

Representando las ecuaciones matricialmente

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

Ecuación 11 Ecuación de estados

$$y = [b_0 \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

Ecuación 12 Ecuación de salida

## OBSERVADORES O ESTIMADORES DE ESTADO

En total existen cuatro estados, dos para el sistema frecuencia, y dos para el sistema voltaje de salida, de los cuales ninguno es medido o sentido, todos son estados internos del sistema, por lo tanto se necesita desarrollar dos observadores, uno para cada sistema.

La representación gráfica del sistema con observador se muestra en la figura 4. [38]

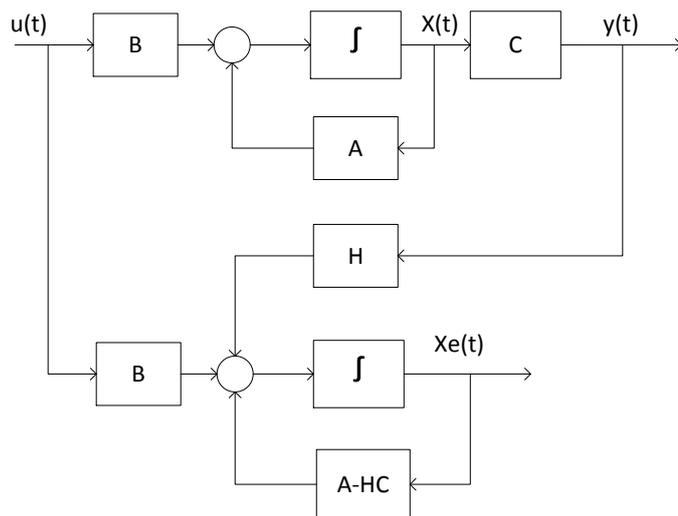


Figura 4 Representación del sistema con observador

Para estimar los estados del sistema frecuencia y del sistema voltaje se necesita determinar el valor de la matriz de realimentación  $H$  de la figura 4 para ambos sistemas

El procedimiento para obtener la matriz  $H$  es por medio de las transpuestas de las matrices  $A$  y  $C$  de la representación matricial de estados y la ubicación de los nuevos polos del observador, que tiene que ser de dinámica más rápida que la del sistema dado por  $A$ . Con esta información se utiliza la instrucción `place` para determinar el valor de la matriz  $H$ .

$$H = \text{place}(A', B', p)$$

#### CONTROLADOR POR EL MÉTODO DE REUBICACIÓN DE POLOS DEL MODELO INTERNO DEL SISTEMA DESACOPLADO.

Se desea diseñar un compensador que garantice que las salidas realicen el seguimiento de la señal de referencia (servocontrol) con error cero, además que mantenga el error cero cuando el sistema es perturbado (control regulador), por este motivo y por tratarse de un sistema tipo cero, se elige como compensador el método de reubicación de polos del modelo interno.

En la figura 4 se muestra el diagrama del modelo interno en donde se cierra el lazo de control dos veces, uno para las variables de estado y otro para regular la salida calculando el error actuante e integrando dicho error.[39]

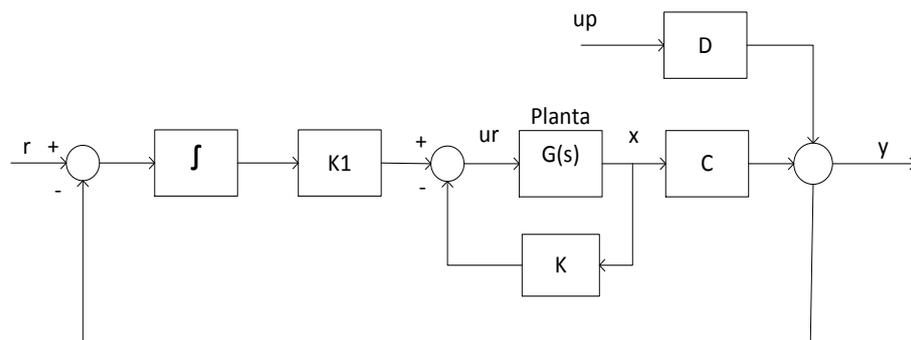


Figura 4 Diagrama del modelo interno

En las centrales de generación eléctrica solo se realiza el control regulador, debido a la importancia de mantener el voltaje y la frecuencia del sistema en los valores programados.

En total se deben desarrollar dos controladores, el primero para el sistema frecuencia y el segundo para el sistema voltaje de salida.

El diseño del controlador consiste en determinar los valores  $K_1$  y  $K$  del diagrama del modelo interno de la figura 4, para determinar tales valores se utiliza la instrucción **place** de Matlab, esta instrucción genera los valores  $K_1$  y

K en una misma matriz. Para generar estos valores necesita el ingreso de la matriz de estado  $A_{mi}$ ,  $B_{mi}$  y los valores propios de  $A_{mi}-B_{mi}K$  que son los valores donde se desea reubicar los polos del sistema según la dinámica deseada, estos valores son ingresados por medio del vector P, la forma de escribir la instrucción place en Matlab es como sigue.

$$K=place(A_{mi},B_{mi},P)$$

Donde:

$$A_{mi} = \begin{bmatrix} 0 & C \\ 0 & A \end{bmatrix}$$

$$B_{mi} = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix}$$

## Ejercicios de la pre-práctica

Dadas las siguientes funciones de transferencia:

$$G_{11}(s) = \frac{\omega}{V_{var\_fre}} = \frac{1676.2553}{(s + 3.035)(s + 3.008)}$$

$$G_{12}(s) = \frac{\omega}{V_{alt}} = \frac{-314.7891}{(s + 4.066)(s + 3.069)}$$

$$G_{21}(s) = \frac{V_a}{V_{var\_fre}} = \frac{18.7866}{(s + 4.237)(s + 3.515)}$$

$$G_{22}(s) = \frac{V_a}{V_{alt}} = \frac{54.4212}{(s + 5.976)(s + 5.975)}$$

### Ejercicio 1

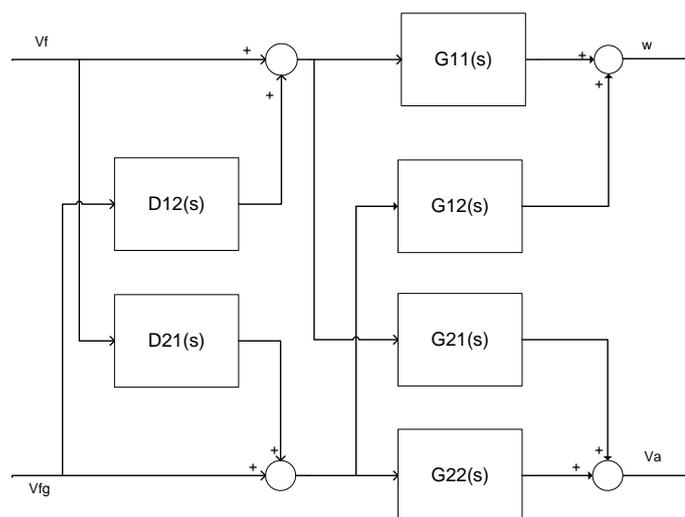
Determinar:

- Los pares de variable manipulada controlada por medio del cálculo de la matriz de ganancia relativa.
- El desacoplador dinámico del sistema frecuencia-voltaje
- La representación del sistema en variable de estado (variable de fase)
- El observador para el sistema frecuencia y el observador para el sistema voltaje de salida.

- El controlador para el sistema frecuencia con un tiempo de estabilización de 5 segundos y un sobrenivel porcentual menor al 5%, y para el sistema voltaje de salida, con un tiempo de estabilización de 1 segundos y un sobrenivel porcentual menor al 5%.

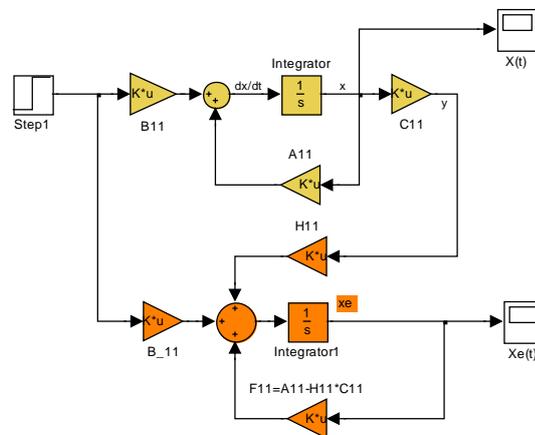
## Ejercicio 2

Verificar los resultados obtenidos del desacoplador, realizando la simulación del siguiente diagrama de bloques en el Simulink de Matlab.



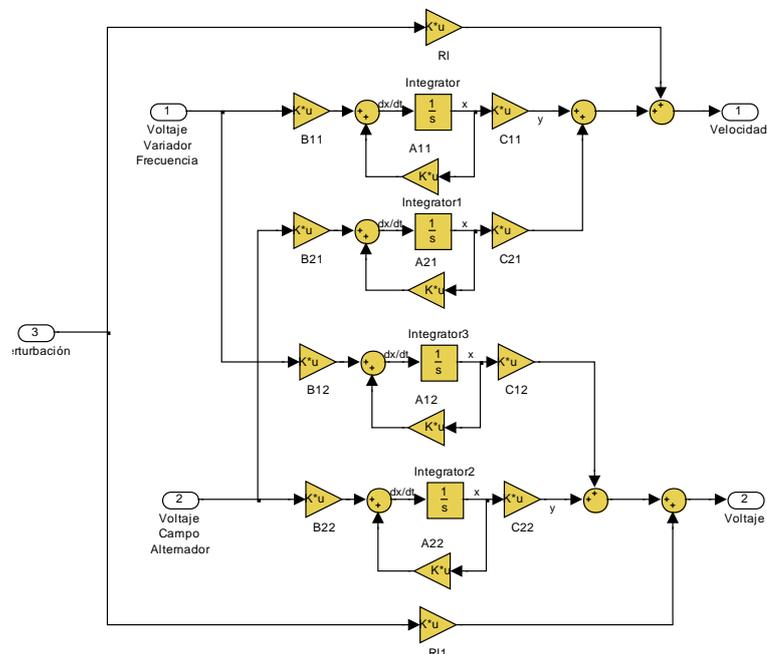
## Ejercicio 3

Verificar los resultados obtenidos del observador para el sistema frecuencia y para el sistema voltaje de salida, realizando la simulación del siguiente modelo en el Simulink de Matlab para ambos sistemas.

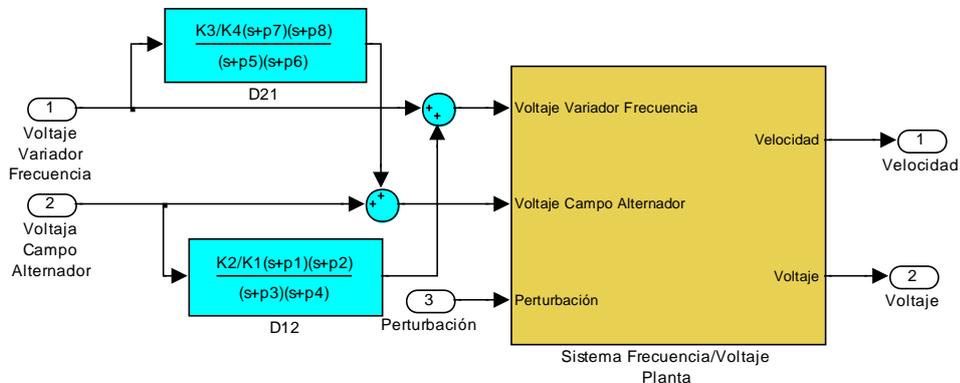


## Ejercicio 4

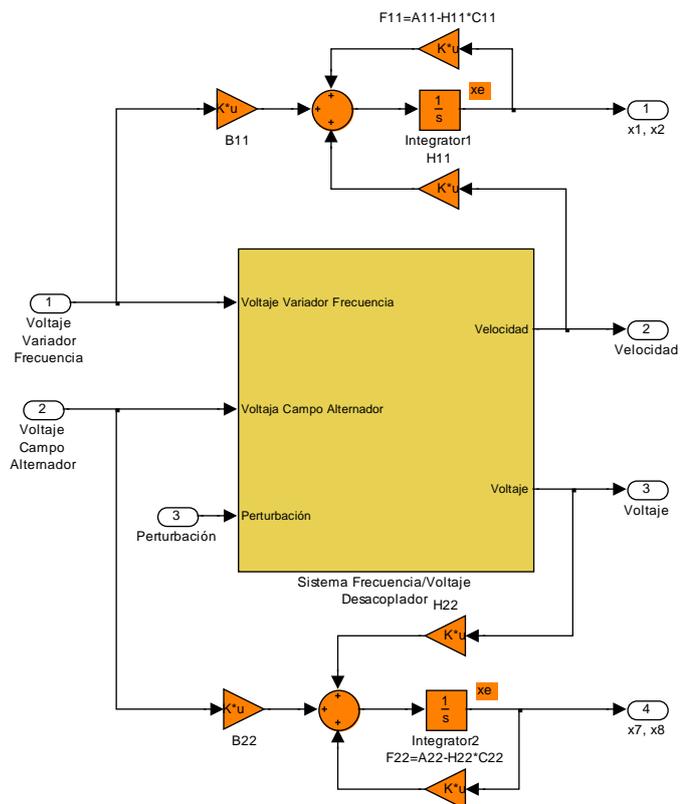
Crear el sistema planta, donde se muestra las cuatro funciones de transferencia del sistema frecuencia-voltaje en variables de estado.



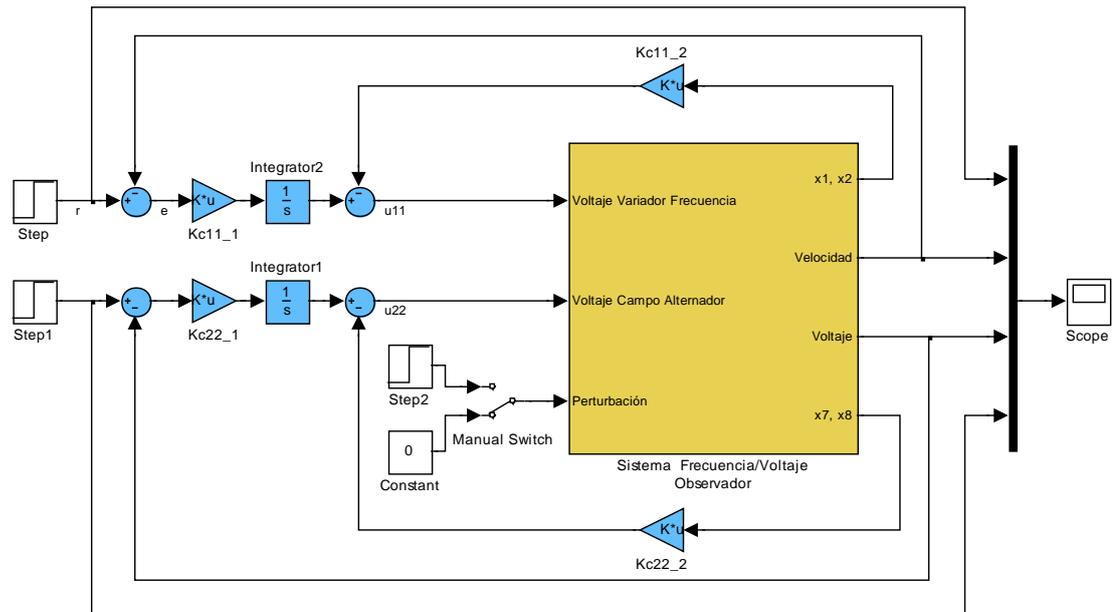
Crear el sistema desacoplador y un subsistema con el sistema planta.



Crear el sistema observador y un subsistema que contiene el sistema desacoplador.



Para comprobar el funcionamiento del controlador, crear el siguiente sistema que contiene el modelo interno y el subsistema que contiene el sistema observador.



**Conclusiones y recomendaciones.**

## Práctica

### CONTROL DEL SISTEMA FRECUENCIA-VOLTAJE

#### **Objetivos:**

- Controlar el sistema frecuencia-voltaje desacoplado, de tal manera que el sistema frecuencia tenga un tiempo de estabilización de 5 segundos y un sobrenivel porcentual menor al 5%, y el sistema voltaje de salida tenga un tiempo de estabilización de 1 segundos y un sobrenivel porcentual menor al 5%.

#### **Puntos de operación del sistema frecuencia-voltaje**

Voltaje de entrada del variador de frecuencia  $V_f=9$  [V].

Voltaje de entrada al campo del alternador  $V_{fg}=5$  [V].

Velocidad de salida  $\omega=1525$  rpm

Voltaje de salida  $V_a=13$  [V]

#### **Procedimiento:**

1. Crear el diagrama planta que consiste en la configuración de los bloques OPC, mostrada en el Anexo B, para la adquisición y envío de señales al banco de prueba

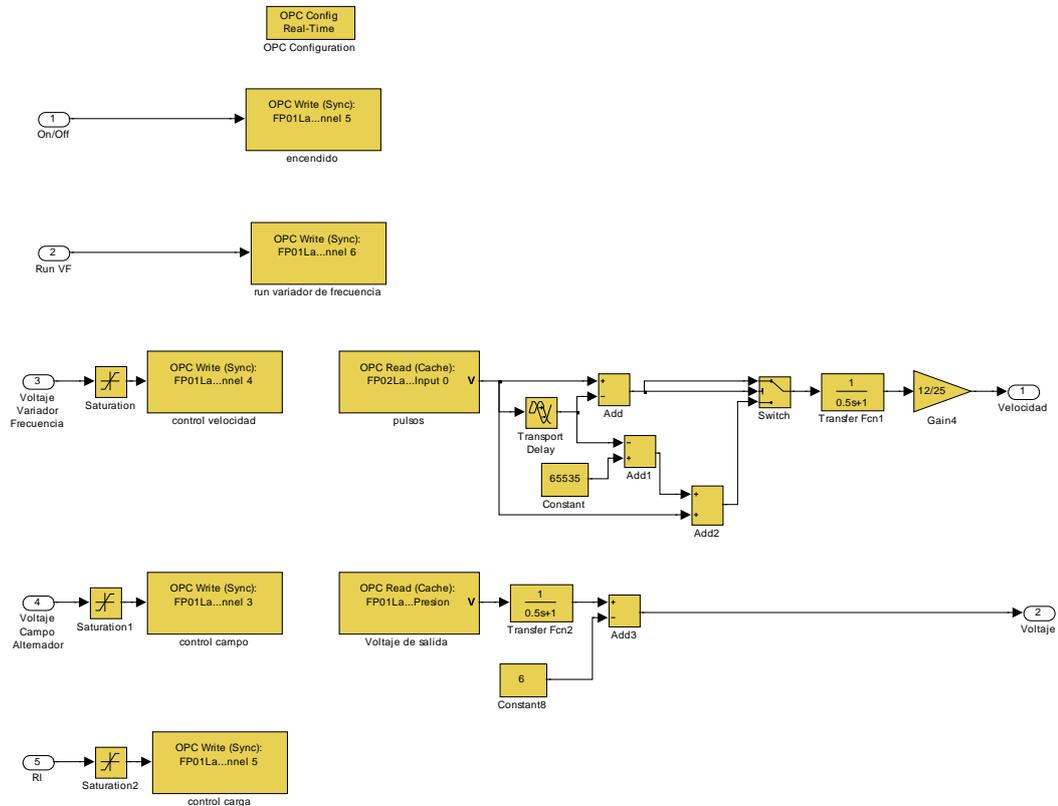


Figura 1 Diagrama planta

El diagrama de bloques de la figura 1 tiene la siguiente configuración.

Saturation=10 [V], saturation1=8[V], saturation2=3.5[V]

Transport Delay=0.5 [s], initial buffer size=1024

Switch ajustar  $u_2 \geq \text{threshold}$

2. Crear el diagrama de bloques desacoplador mostrado en la figura 2 en el Simulink de Matlab.

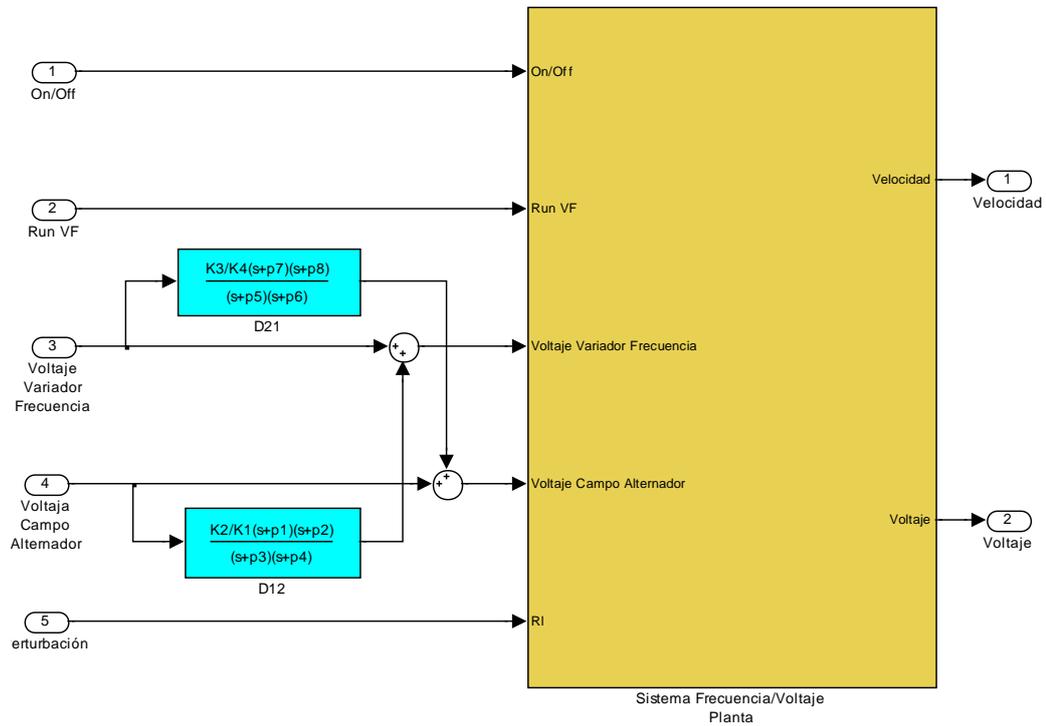


Figura 2 Diagrama desacoplador

Los valores de D12 y D21, son las funciones de transferencia obtenidas en el diseño del desacoplador de la pre-práctica. Para comprobar el funcionamiento del desacoplador se necesita agregarle las señales de prueba a la figura 2

3. Crear el diagrama de bloques observador mostrado en la figura 3, en el Simulink de Matlab.

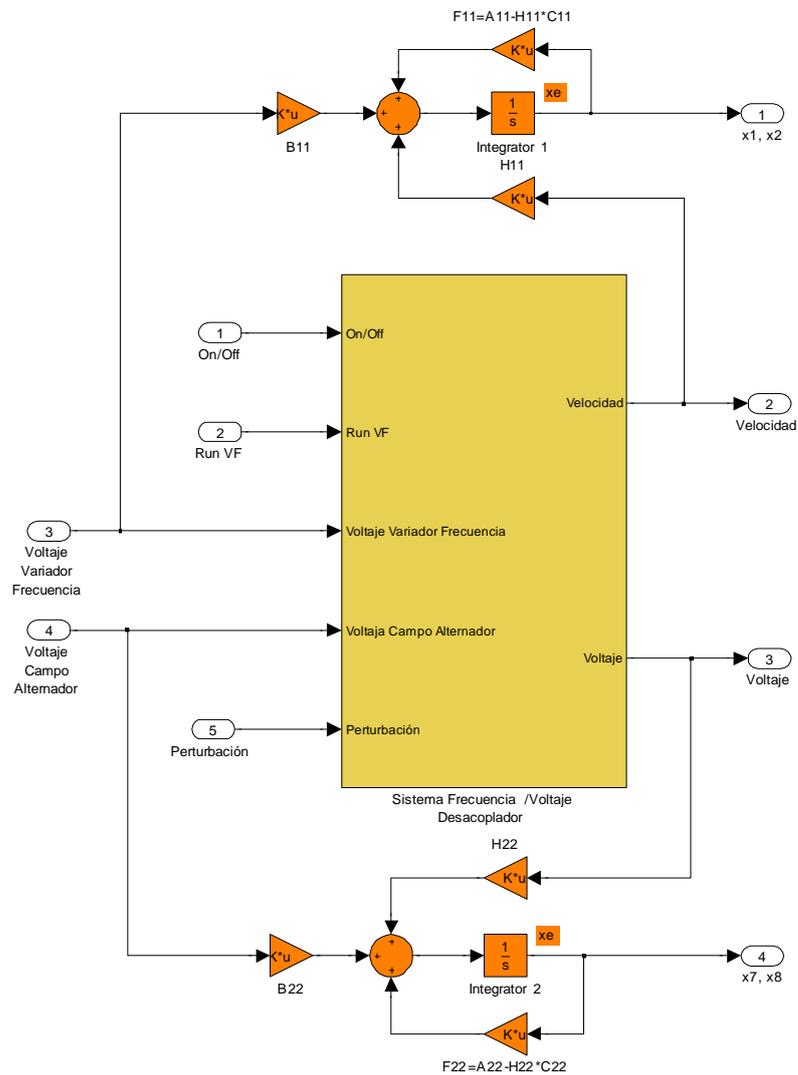


Figura 3 Diagrama observador

Los valores de los parámetros del observador, son los valores obtenidos en el diseño del observador de la pre-práctica. Para comprobar el funcionamiento del observador y compararlo con la simulación de la pre-práctica se necesita agregarle las señales de prueba a la figura 3.

4. Crear el diagrama de bloques control de la figura 4, en el Simulink de Matlab.

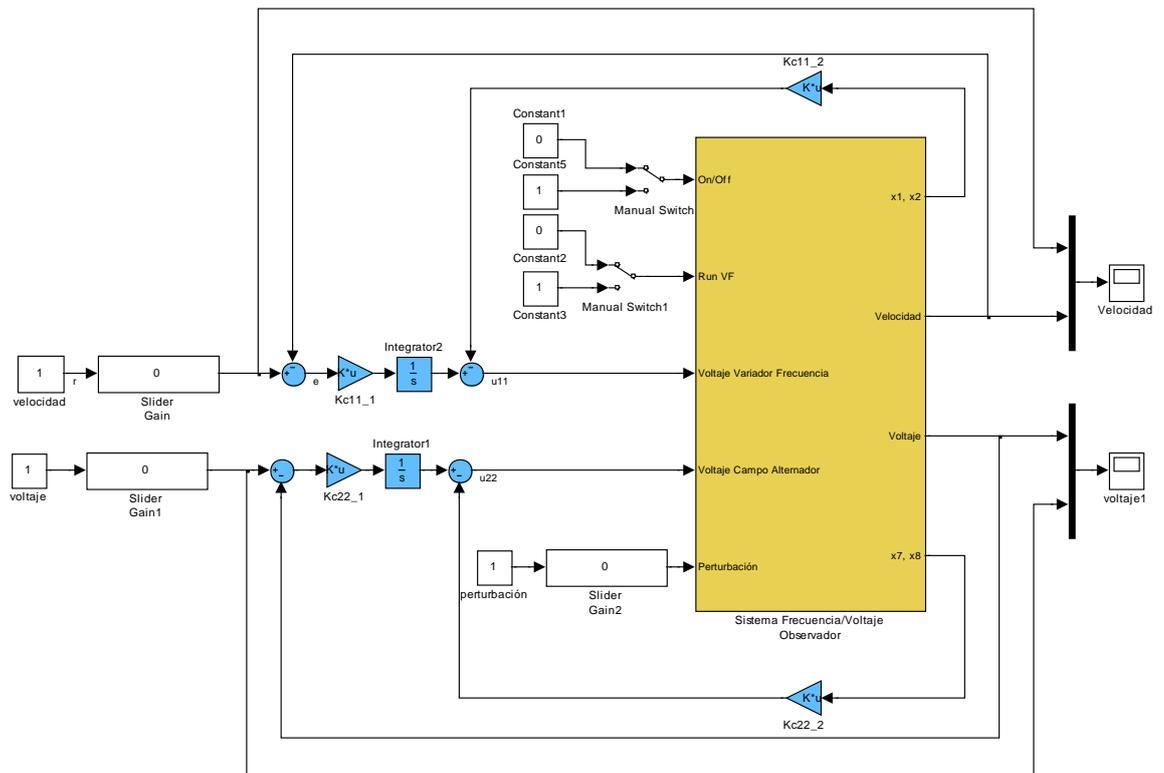


Figura 4 Diagrama de control

El diagrama de la figura 4 muestra el diagrama para realizar el control del sistema frecuencia-voltaje basado en el modelo interno, los parámetros del controlador, son los valores del diseño del controlador de la pre-práctica.

### Análisis de resultados

## BIBLIOGRAFÍA

1. Dorf, Richard; Bishop, Robert, Sistemas de Control Moderno, Pearson Prentice Hall – Madrid 2005.
2. Sergio Domínguez, Pascual Campoy, José María Sebastián, Agustín Jiménez, Control en el espacio de estados, Prentice hall, 2006
3. Katsuhiko Ogata, Ingeniería de control moderna, Prentice hall, 2010
4. Abel, D.; Bolling, A. – Rapid Control Prototyping, Methoden und Anwendungen – Springer – Berlín 2006.
5. Maestría en automatización y control industrial (MACI), Interacción en sistemas multivariables, fecha de consulta Enero del 2013.
6. Smith Carlos, Corripio Armando, Multivariable process control, Noriega Limusa, 1991.
7. María Antonieta Alvarez, Jose Luis Gonzales, “Diseño e implementación de un sistema de control de frecuencia y voltaje utilizando Matlab”, informe de trabajo de graduación, Facultad de ingeniería en electricidad y computación, Escuela Superior Politécnica del litoral, 2005
8. Chapman Stephen J., máquinas eléctricas, McGraw Hill, 2005

9. Liwshitz Michael, WhippleClyde, máquinas de corriente alterna, C. E. C. S. A, México 1974
10. B.M. Weedy, electric power systems, John Wiley & Sons, 1975
11. Albert Moser, Power systems II, institute fur elektrische anlagen und energiewirtschaft, fecha de consulta Junio del 2013.
12. Schneider Electric guía de programación ATV-302, [http://download.schneiderelectric.com/files?p\\_File\\_Id=27535390&p\\_File\\_Name=ATV312\\_programming\\_manual\\_SP\\_BBV46387\\_02.pdf](http://download.schneiderelectric.com/files?p_File_Id=27535390&p_File_Name=ATV312_programming_manual_SP_BBV46387_02.pdf), fecha de consulta Diciembre del 2011.
13. Siemens, manual de motores trifásicos de inducción, [http://prof.usb.ve/jaller/Guia\\_Mag\\_pdf/cat\\_motores\\_ind.pdf](http://prof.usb.ve/jaller/Guia_Mag_pdf/cat_motores_ind.pdf), fecha de consulta diciembre del 2011
14. Kuebler, Rotary measuring technology, [http://www.kuebler.com/PDFs/archiv/.../5810\\_en.pdf](http://www.kuebler.com/PDFs/archiv/.../5810_en.pdf), fecha de consultadiciembre del 2011.
15. Del Pozo Juan, prácticas del lab. De control automático, <http://www.jdelpozo.espol.edu.ec/web/herramientas/referencias.asp>, fecha de consulta febrero del 2013.

16. Cenace, sistemas de regulación de velocidad,  
<http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/826/32/Regulaci%C3%B3nVelocidad%201.pdf>, fecha de consulta Junio del 2013.