

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

SEDE LATACUNGA



**CARRERA DE INGENIERÍA
ELECTROMECAÁNICA**

IMPLEMENTACIÓN DE UN SINCRONOSCOPIO VIRTUAL PARA
ACOPLAMIENTO AUTOMÁTICO DE GENERADORES A LA RED
PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**ELABORADO POR:
CRUZ PANCHI LUIS ROLANDO**

Latacunga, mayo de 2008

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado en su totalidad por el Sr. Cruz Panchi Luis Rolando, bajo nuestra Supervisión.

Ing. Mario Jiménez
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Marco Singaña
CODIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Washington Freire
DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Eduardo Vázquez
SECRETARIO ABOGADO

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Quien suscribe, Cruz Panchi Luis Rolando portador de la cédula de identidad 050259517-6, con libertad y voluntariamente declaro que el tema de investigación: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SINCRONOSCOPIO VIRTUAL PARA ACOPLAMIENTO AUTOMÁTICO DE GENERADORES A LA RED PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS”**, su contenido, ideas, análisis, implementación, conclusiones y recomendaciones son originales, auténticos y personales.

En tal virtud son para efectos legales y académicos que se desprenden de la presente tesis, es y será de mi exclusiva responsabilidad legal y académica como autor de este proyecto de grado.

Atentamente,

RESUMEN

El propósito del presente trabajo consiste en el diseño e implementación de un sincronoscopio automático, para acoplar generadores trifásicos a la red eléctrica; el mismo que consiste en un módulo autónomo capaz de sensar los parámetros eléctricos de la red y emitir las respectivas señales de control para que el generador entrante pueda ser acoplado en paralelo al sistema. Cuando el acoplamiento ha sido efectuado se habilita el control desde un PC, desde el cual se puede controlar: la potencia activa, la potencia reactiva y el desacople del sistema.

En los dos primeros capítulos se presenta las bases teóricas para: determinar el funcionamiento, realizar el diseño, y efectuar cálculos; necesarias para planificar de forma sistemática el desarrollo del proyecto.

El tercer capítulo trata del diseño electrónico del sistema, aquí se diseña y desarrolla toda la parte física del módulo de sincronización automática, se determinan las variables, su forma de adquisición, control y acondicionamiento.

En el cuarto capítulo, se desarrolla el programa de control que constituye el firmware del microcontrolador; aquí se indican los diagramas de flujo de cada proceso y los registros del microcontrolador que se deben incluir. También se incluye el programa de control para la PC que constituye el software y está desarrollado en LabView 7.1.

El capítulo cinco corresponde a la implementación y pruebas del sistema, en éste se detalla: las pruebas realizadas al sistema previo a la implementación, el diseño de las tarjetas, el montaje, las pruebas finales de las tarjetas, y las pruebas de comunicación.

En el capítulo VI se incluyen las conclusiones y recomendaciones finales respecto al desarrollo del proyecto. El trabajo concluye con los Anexos en los cuales se incluye la información extra empleada.

BIBLIOGRAFÍA.

- Kosow I. L, Máquinas Eléctricas y Transformadores, segunda edición, Prentice-Hall, México D. F, 1993.
- Fitzgerald A. E, Máquinas Eléctricas, quinta edición, McGraw-Hill, México D.F, 1992.
- Chapman S. J, Máquinas Eléctricas, cuarta edición, McGraw-Hill, México D.F, 2005.
- Kosow I. L, Control de Máquinas Eléctricas, Barcelona-Reverté, 1982.
- Richardson D. V, Máquinas eléctricas rotativas y transformadores, cuarta edición, Prentice-Hall, México D. F, 1997.
- Pérez E. M, Instrumentación electrónica, Alfaomega, México D. F, 1996.
- Soisson H. E, Instrumentación industrial, Limusa, México D. F, 1992.
- Muller W, Electrotecnia de potencia, curso superior, Reverté, Barcelona, 1984.
- Cosidine D. M, Manual de instrumentación aplicada, Continental, México D. F, 1971.
- Manuel A, Instrumentación virtual: adquisición, procesado y análisis de señales, Alfaomega, México D. F, 2002.
- Pallás R. A, Sensores y acondicionadores de señal, Alfaomega, México D. F, 2001.
- Ruiz S. A, Diseño y construcción de prototipos electrónicos, Paraninfo, Madrid, 2000.
- Usategui M. A, Microcontroladores PIC: diseño práctico de aplicaciones, tercera edición, McGraw-Hill, España, 2003.
- Electrónica y computadores, proyectos, tecnología, aplicaciones prácticas, teoría, Pereira: CEKIT, 1997.
- Ramos R. G, Curso práctico de electrónica industrial y automatización, Pereira: CEKIT S.A., 2002.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 GENERADORES SINCRÓNICOS

1.1	Introducción.	1
1.2	Aspectos constructivos.	2
1.2.1	Generador síncrono de campo estacionario.	2
1.2.2	Generador síncrono de campo rotatorio.	3
1.2.2.1	Generador síncrono con rotor de polos salientes.	4
1.2.2.2	Generador Síncrono con rotor cilíndrico.	4
1.3	Principio de funcionamiento.	5
1.3.1	Velocidad de rotación de generador síncrono.	6
1.3.2	Voltaje generado internamente en un generador síncrono.	6
1.3.3	Circuito equivalente de un generador sincrónico.	8
1.3.4	Potencia y par en los generadores sincrónicos.	13
1.3.5	Determinación de los parámetros del generador sincrónico.	15
1.4	Sistemas de excitación.	17
1.4.1	Excitatriz de corriente continua.	18
1.4.2	Excitatriz de corriente alterna.	19
1.5	Funcionamiento en paralelo de generadores.	20
1.5.1	Condiciones necesarias para la conexión en paralelo.	20
1.5.2	Procedimiento para la sincronización de generadores.	22
1.6	El Sincronoscopio.	26
1.6.1	Sincronoscopio de aspa polarizada.	27
1.6.2	Sincronoscopio de hierro móvil.	28
1.6.3	Sincronoscopio de bobinas cruzadas.	28
1.6.4	Relé de sincronismo.	29
1.7	Indicador de secuencia de fases.	30

2 INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

2.1	Introducción.	33
2.2	Sistemas de medida.	34
2.2.1	Funciones de un sistema de medida.	35

2.3	Medida de magnitudes eléctricas.	37
2.3.1	Resistencia Shunt.	37
2.3.2	Transformador de intensidad.	40
2.3.3	Sensores de efecto Hall.	43
2.3.3.1	Sensor Hall de corriente.	43
2.3.3.2	Sensor Hall de tensión.	45
2.3.3.3	Medida de la Potencia Eléctrica.	46
2.3.4	Sensores Magnetorresistivos.	48
2.3.5	Sensores de fibra óptica.	50
2.4	Microcontroladores.	51
2.4.1	Arquitectura de los PIC.	52
2.4.2	El procesador.	54
2.4.3	Organización de la memoria.	55
2.4.3.1	Memoria de datos.	55
2.4.3.2	Memoria de programa.	55
2.4.4	Descripción del PIC18F452.	56
2.4.4.1	Oscilador.	57
2.4.4.2	Puertos de Entrada/Salida.	59
2.4.4.3	Conversores A/D.	63
2.4.4.4	Temporizadores y contadores.	64
2.4.4.5	Comparador analógico.	65
2.4.4.6	Interrupciones.	65
2.4.4.7	Perro guardián o "Watchdog".	66
2.4.4.8	Estado de reposo o de bajo consumo.	66
2.4.4.9	Módulos de Comunicación.	67
2.5	Puerto Serial.	70
2.5.1	El protocolo RS232.	70
2.5.2	Tipos de comunicación serial.	72
2.5.3	Niveles de voltaje.	74
2.5.4	El circuito integrado MAX-232.	75
2.5.5	Pasos para establecer una comunicación serial.	76
2.5.5.1	Velocidad.	76
2.5.5.2	Paridad.	76
2.5.5.3	Control de flujo.	77

2.6	Acceso al puerto serial a través de LabView.	77
2.6.1	VISA para el control de instrumentos	78
2.6.2	Comunicación por puerto RS-232 y LabView.	78

3 DISEÑO ELECTRÓNICO

3.1	Introducción.	81
3.2	Determinación de la mecánica del proceso.	82
3.2.1	Requerimientos del sistema.	83
3.2.2	Identificación de las variables.	84
3.2.2.1	Variables de entrada.	84
3.2.2.2	Variables de salida.	86
3.3	Medición de variables y acondicionamiento de señales.	87
3.3.1	Medición de voltaje.	89
3.3.2	Medición de frecuencia.	92
3.3.3	Indicador de secuencia de fases.	94
3.3.4	Medición de corriente.	98
3.3.5	Medición del ángulo entre voltaje y corriente	100
3.3.6	Potencia entregada.	103
3.4	Señales de control.	103
3.4.1	Control de velocidad.	103
3.4.2	Control de Campo de excitación.	108
3.5	Ingreso y visualización datos.	111
3.6	Elección del Microcontrolador.	114

4 DISEÑO DEL SOFTWARE

4.1	Introducción.	118
4.2	Programación del microcontrolador.	118
4.2.1	Lenguaje de programación mikroBasic.	120
4.2.1.1	Organización interna del programa.	121
4.2.1.2	Tipo y declaración de datos.	122
4.2.1.3	Operadores aritméticos.	123
4.2.1.4	Estructuras de control condicionales e iterativas.	124

4.2.2	Diseño del Firmware.	126
4.2.2.1	Página Principal o página de Menú.	127
4.2.2.2	Página de visualización de datos.	133
4.2.2.3	Página de control Manual.	134
4.2.2.4	Página de control Automático.	138
4.2.2.5	Interfaz para el control de potencia.	147
4.3	Instrumentación Virtual.	149
4.3.1	Introducción LabView 7.1.	150
4.3.2	Programación con LabView.	150
4.3.3	Diseño del Software de monitoreo y control.	152
4.3.3.1	Monitoreo y supervisión de datos.	153
4.3.3.2	Control virtual del módulo.	155

5 Implementación y pruebas

5.1	Introducción.	157
5.2	Circuitos de prueba.	157
5.2.1	Pruebas de la Tarjeta de Entradas.	157
5.2.2	Pruebas de la Tarjeta de Salidas.	161
5.2.3	Pruebas de la Tarjeta de Control.	163
5.2.4	Pruebas de la Tarjeta para el Voltímetro Diferencial.	165
5.3	Instalación y montaje.	167
5.4	Calibración.	169
5.5	Pruebas de funcionamiento.	171
5.6	Pruebas de comunicación.	176
5.6.1	Transmisión y recepción de datos.	176
5.7	Análisis técnico-económico.	178

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1	Conclusiones.	182
6.2	Recomendaciones.	184

BIBLIOGRAFIA	186
---------------------	------------

ANEXOS

- ANEXO A. Hojas de especificaciones técnicas.
- ANEXO B. Especificaciones del variador de frecuencia ACS300.
- ANEXO C. Diagramas de bloques y registros del PIC18F452.
- ANEXO D. Circuitos impresos de las tarjetas electrónicas.
- ANEXO E. Fotografías del módulo implementado.
- ANEXO F. Manual de usuario.

LISTADO DE FIGURAS

CAPITULO I

Figura 1—1	Generador sincrónico simple.	1
Figura 1—2	Sección axial de un generador sincrónico de campo estacionario y armadura giratoria.	2
Figura 1—3	Dínamo síncrona de campo rotatorio.	3
Figura 1—4	Modelo del generador sincrónico con polos salientes.	4
Figura 1—5	Modelo del generador sincrónico con rotor cilíndrico.	5
Figura 1—6	Curva característica de un generador en vacío.	8
Figura 1—7	Modelo de reacción del inducido.	9
Figura 1—8	Circuito equivalente de un generador sincrónico trifásico.	12
Figura 1—9	(a) Circuito equivalente del generador, conectado en Y	12
	(b) Circuito equivalente del generador, conectado en Δ	12
Figura 1—10	Flujo de potencia de un generador sincrónico.	14
Figura 1—11	Pérdidas de potencia en un generador sincrónico.	14
Figura 1—12	Esquema de conexiones para el ensayo en vacío.	16
Figura 1—13	(a) Circuito equivalente del generador durante el ensayo en cortocircuito	16
	(b) Curva característica de un generador en cortocircuito.	16
Figura 1—14	Acoplamiento de la excitatriz de corriente continua.	18
Figura 1—15	Conexión eléctrica del sistema de excitación.	18
Figura 1—16	Generador con excitatriz principal.	19
Figura 1—17	Conexión en paralelo de dos generadores.	20
Figura 1—18	Posibles secuencias de fase de un sistema trifásico.	21
Figura 1—19	Desfase entre voltajes semejantes del Generador y la Red	22
Figura 1—20	Sincronización por lámparas.	23
Figura 1—21	Onda de voltaje durante el proceso de sincronización de generador y red.	24
Figura 1—22	Deslizamiento interno del generador sincrónico.	25
Figura 1—23	Circuito, carátula y principio de funcionamiento del sincronoscopio, del tipo de aspa polarizada.	27
Figura 1—24	Sincronoscopio de bobinas cruzadas.	29

Figura 1—25 Relé de sincronismo SYNCHRO MAX.	30
Figura 1—26 Circuito y diagrama fasorial del indicador de secuencia de fases.	31
Figura 1—27 Indicador de secuencia de fases.	32

CAPITULO II

Figura 2—1 Objeto de un sistema de medida.	34
Figura 2—2 Funciones principales de un sistema de medida.	35
Figura 2—3 Elementos de un sistema de medida.	36
Figura 2—4 Configuración básica para la medida de corriente.	38
Figura 2—5 Esquema interno del INA139.	39
Figura 2—6 (a) Circuito eléctrico del ZXCT1009 para medir corriente (b) Implementación de Rs en las pistas de cobre del PCB	40
Figura 2—7 (a) Construcción del transformador de corriente. (b) diagrama vectorial del transformador de corriente.	42
Figura 2—8 Medición de potencia usando un transformador de intensidad.	43
Figura 2—9 Formas constructivas de sensores Hall de corriente.	44
Figura 2—10 (a) salida en corriente de un sensor Hall de corriente (b) salida en tensión de un sensor Hall de corriente.	45
Figura 2—11 Conexión típica de un sensor Hall de tensión.	46
Figura 2—12 Diagrama de bloques de una medida de potencia activa.	47
Figura 2—13 Medida de la potencia eléctrica basada en el efecto hall.	47
Figura 2—14 Estructura interna de un sensor de corriente MR	49
Figura 2—15 Distribución de pines y diagrama de bloques del sensor GMR de la serie AAOO2 de NVE.	49
Figura 2—16 Sensor óptico de corriente.	50
Figura 2—17 Arquitectura Von Neumann.	52
Figura 2—18 Arquitectura Harvard.	53
Figura 2—19 Encapsulado DIP del PIC18F452.	56
Figura 2—20 Encapsulado TQFP del PIC18F452.	56
Figura 2—21 Conexión para operación en modo HS, XT Y ó PL.	58
Figura 2—22 Configuración con reloj externo para modo EC.	59

Figura 2—23 Configuración con reloj externo para modo ECIO.	59
Figura 2—24 Diagrama de pines del PIC18F452.	60
Figura 2—25 Diagrama de bloques del conversor A/D.	63
Figura 2—26 Diagrama de bloques del Transmisor USART.	68
Figura 2—27 Diagrama de bloques del Receptor USART.	69
Figura 2—28 Esquema de conexión para comunicación serial.	69
Figura 2—29 Disposición de pines del conector DB-9 macho.	70
Figura 2—30 Estructura de la transmisión asincrónica de un caracter.	73
Figura 2—31 Niveles de voltaje utilizados en el puerto serial.	74
Figura 2—32 Uso del MAX-232 para comunicar un microcontrolador y el PC.	75
Figura 2—33 Comunicación de un dispositivo RS-232 con NI-VISA.	79
Figura 2—34 Configuración del puerto serial con VISA.	80

CAPITULO III

Figura 3—1 Diagrama de bloques del sistema.	82
Figura 3—2 Señal de voltaje analógico.	87
Figura 3—3 Niveles de voltaje digital.	88
Figura 3—4 Configuración del transistor en corte y saturación.	88
Figura 3—5 Circuito para sensor el voltaje.	89
Figura 3—6 Simulación del divisor de voltaje.	91
Figura 3—7 Simulación del circuito sensor de voltaje.	92
Figura 3—8 Acondicionamiento de señal para sensor frecuencia.	93
Figura 3—9 Conformación de la onda de voltaje.	94
Figura 3—10 Diagrama de bloques del indicador de secuencia trifásica.	95
Figura 3—11 Indicador de secuencia trifásica.	96
Figura 3—12 Método de detección de la secuencia de fases.	97
Figura 3—13 Transformador de corriente 010.421	98
Figura 3—14 Circuito de acondicionamiento para medir la corriente.	99
Figura 3—15 Amplificador y acondicionamiento de corriente.	100
Figura 3—16 Ondas de Voltaje y Corriente.	101
Figura 3—17 Circuito de conformación de la Corriente.	101
Figura 3—18 Onda de corriente conformada.	102

Figura 3—19 Bornes de entrada/salida del ACS 300.	104
Figura 3—20 Modulación por ancho de pulso.	105
Figura 3—21 Circuito conversor D/A con PWM.	107
Figura 3—22 Circuito de control de campo.	108
Figura 3—23 Estructura física de un transistor NMOS.	109
Figura 3—24 Curva característica de un transistor NMOS.	110
Figura 3—25 Circuito de control de campo.	111
Figura 3—26 LCD QY2004A.	111
Figura 3—27 Interfaz del LCD con un sistema de control.	113
Figura 3—28 Mapa de direcciones del LCD 20x4.	113
Figura 3—29 PIC18F452 - empaquetado DIP 40.	116

CAPITULO IV

Figura 4—1 Hardware GTP USB PLUS.	119
Figura 4—2 Ventana de programación de mikroBasic.	120
Figura 4—3 Ventana de configuración del dispositivo.	127
Figura 4—4 Diagrama de flujo del programa principal.	128
Figura 4—5 Página de inicio.	132
Figura 4—6 Página principal.	132
Figura 4—7 Diagrama de flujo para visualización de datos.	133
Figura 4—8 Página de visualización de datos.	134
Figura 4—9 Diagrama de flujo para el control manual del módulo.	135
Figura 4—10 Página de opciones de control manual.	136
Figura 4—11 Página de control de campo.	136
Figura 4—12 Página de control de velocidad.	137
Figura 4—13 Diagrama de bloques y expresión matemática del control PID.	140
Figura 4—14 Algoritmo para programar el control PID.	141
Figura 4—15 Diagrama de flujo para lectura del setpoint de voltaje y frecuencia.	142
Figura 4—16 Página de control automático.	143
Figura 4—17 Lectura automática del setpoint.	143
Figura 4—18 Diagrama de flujo para obtener el offset de frecuencia.	144

Figura 4—19 Diagrama de flujo para obtener el offset de voltaje.	145
Figura 4—20 Control PID de frecuencia y voltaje.	146
Figura 4—21 Adquisición de datos para el cálculo de potencia.	148
Figura 4—22 Paleta de herramientas, controles y funciones.	151
Figura 4—23 Configuración del módulo VISA.	152
Figura 4—24 Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos	153
Figura 4—25 Medición de potencia trifásica con dos vatímetros.	154
Figura 4—26 Desfase entre voltaje de línea y voltaje de fase.	154
Figura 4—27 Panel frontal para la supervisión y control de potencia.	155
Figura 4—28 Transmisión de datos para control.	156

CAPITULO V

Figura 5—1 Diagrama esquemático de la tarjeta de entradas.	158
Figura 5—2 Secuencia de fases y frecuencia de la Red Eléctrica.	159
Figura 5—3 Secuencia de fases, frecuencia y desfase del generador.	160
Figura 5—4 Señal acondicionada para la medición de frecuencia.	161
Figura 5—5 Diagrama esquemático de la tarjeta de salidas.	161
Figura 5—6 Acondicionamiento de señal para el control de campo.	162
Figura 5—7 Acondicionamiento para el control de velocidad.	162
Figura 5—8 Diagrama esquemático de la tarjeta de control.	164
Figura 5—9 Pruebas de adquisición y control de datos.	165
Figura 5—10 Diagrama esquemático del voltímetro diferencial.	166
Figura 5—11 Voltímetro diferencial.	167
Figura 5—12 Disposición modular de las tarjetas.	167
Figura 5—13 Parte frontal del módulo de sincronización automático.	168
Figura 5—14 Calibración del voltaje.	169
Figura 5—15 Diagrama de linealidad de voltaje.	170
Figura 5—16 Calibración de la frecuencia.	171
Figura 5—17 Botones para iniciar el control del módulo.	172
Figura 5—18 Supervisión de datos.	172
Figura 5—19 Control manual de voltaje.	173
Figura 5—20 Mínimo y Máximo Voltaje Diferencial.	174
Figura 5—21 Verificación visual del estado de la comunicación.	175

Figura 5—22 Datos enviados por el microcontrolador.	177
Figura 5—23 Monitoreo del Módulo de Sincronización Automático.	177
Figura 5—24 Recepción de datos para el control del módulo.	178

LISTADO DE TABLAS

CAPITULO I

Tabla 1—1 Funcionamiento del indicador de secuencia de fases.	31
---	----

CAPITULO II

Tabla 2—1 Naturaleza y tipos de variables.	34
Tabla 2—2 Comparación de sensores Hall de corriente.	44
Tabla 2—3 Comparación de tecnologías para la medida de corriente eléctrica.	51
Tabla 2—4 Tipos de osciladores.	57
Tabla 2—5 Selección de capacitores para oscilador de cristal.	58
Tabla 2—6 Descripción de pines del PIC 18F452.	60
Tabla 2—7 Descripción de pines conector DB-9.	71

CAPITULO III

Tabla 3—1 Variables de entrada.	85
Tabla 3—2 Variables de salida.	86
Tabla 3—3 Familias de circuitos digitales.	88
Tabla 3—4 Placa de características Motor 004.003.	103
Tabla 3—5 Frecuencia mínima según oscilador empleado.	107
Tabla 3—6 Distribución de pines del LCD.	112
Tabla 3—7 Asignación de pines del microcontrolador.	116

CAPITULO IV

Tabla 4—1 Tipos de datos en mikroBasic.	122
Tabla 4—2 Operadores aritméticos en mikroBasic.	124
Tabla 4—3 Librería ADC_Read	129
Tabla 4—4 Librería LCD_Config.	130
Tabla 4—5 Librería LCD_Out	130

Tabla 4—6 Librería PWM_Init	131
Tabla 4—7 Librería PWM_Change_Duty	131
Tabla 4—8 Librería USART_Init	131
Tabla 4—9 Tipos de control en lazo cerrado.	138

CAPITULO V

Tabla 5—1 Voltaje de entrada vs. Voltaje de salida.	169
Tabla 5—2 Costo de componentes.	179

CAPITULO I

1 GENERADORES SINCRÓNICOS.

1.1 Introducción.

Los *generadores sincrónicos o alternadores* son máquinas sincrónicas que se usan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna.¹

Los generadores sincrónicos son además el principal responsable de la generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energía primaria. La figura 1-1 describe un generador sincrónico simple.

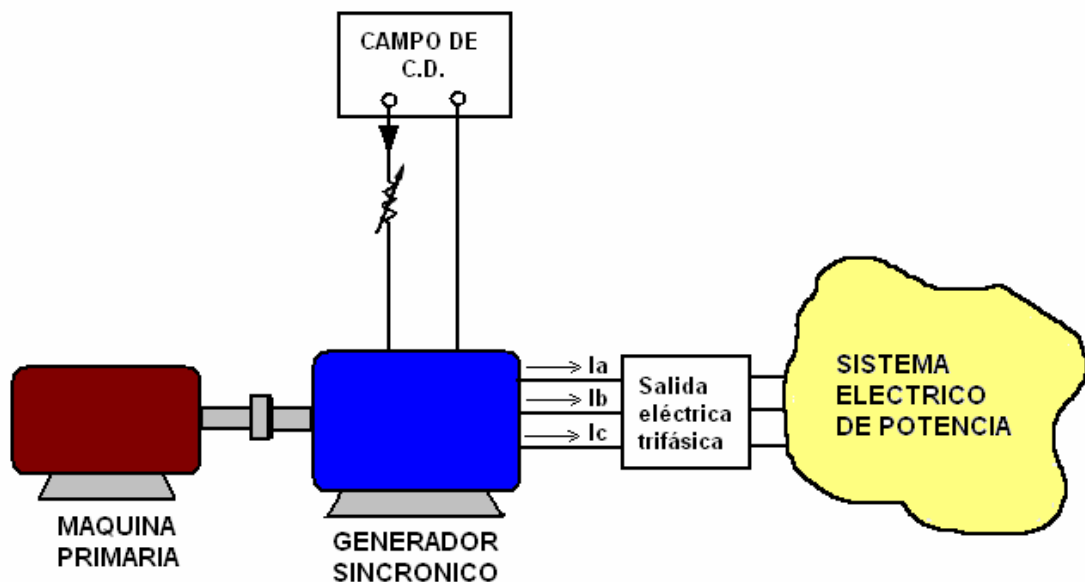


Figura 1—1 Generador sincrónico simple.

¹ <http://www.beckwithelectric.com/infoctr/spanish/tutorialgenIEEE.pdf>

1.2 Aspectos constructivos.²

Existen dos posibilidades de construcción de una dínamo síncrona; dínamo síncrona de campo estacionario y la dínamo síncrona de campo rotatorio, siendo esta última la que se emplea casi universalmente para la generación de corriente eléctrica alterna.

1.2.1 Generador síncrono de campo estacionario.

En la figura 1-2 se detalla una dínamo síncrona en la cual el campo es estacionario y la armadura es la que gira. El devanado de campo se excita mediante una fuente de cd. El devanado de la armadura del rotor se conecta con anillos rozantes. Esta máquina o dínamo puede trabajar tanto como generador síncrono de armadura giratoria o como motor, dependiendo de si se le alimenta con cd o ca a las escobillas.

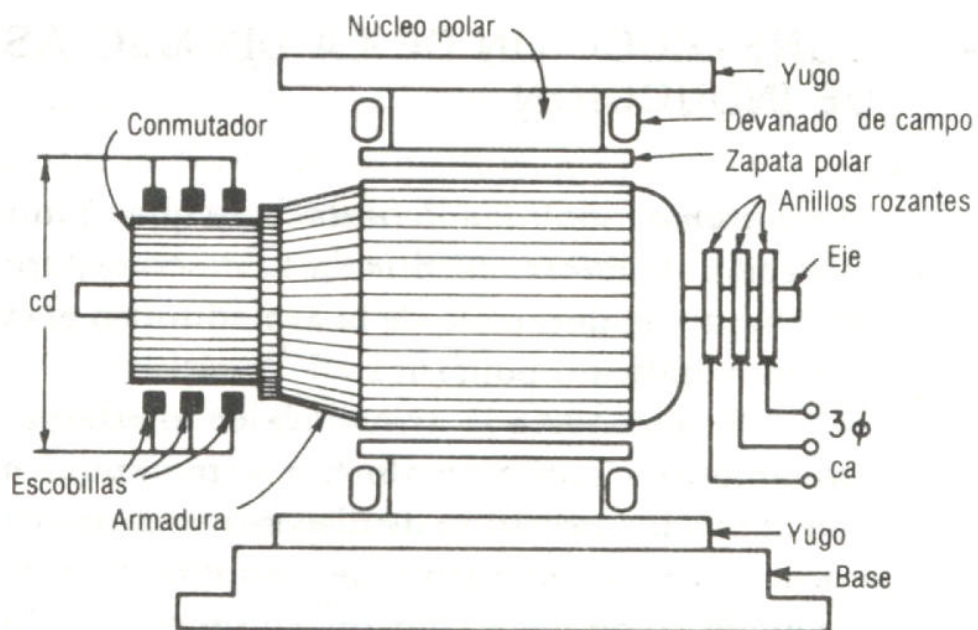


Figura 1—2 Sección axial de un generador sincrónico de campo estacionario y armadura giratorio.

² IRVING KOSOW, Máquinas Eléctricas y Transformadores, Segunda Edición, página 42.

Este tipo de construcción tiene su principal aplicación como *convertidor síncrono o rotatorio*, el cual se usaba anteriormente para convertir corriente directa en corriente alterna y viceversa. Si se aplica corriente directa a las escobillas, la máquina trabaja simultáneamente como motor de cd y alternador de ca. Por el contrario si se aplica corriente alterna a los anillos rozantes la máquina trabaja simultáneamente como motor de ca y generador de cd. En la actualidad este tipo de convertidores han sido sustituidos por grandes convertidores e inversores electrónicos de estado sólido.

1.2.2 Generador síncrono de campo rotatorio.

La figura 1-3 representa una máquina síncrona que tiene un campo rotatorio y una armadura estacionaria. Si se aplica al *bobinado del rotor o inductor* una corriente continua por medio de una excitatriz, se producirá un campo magnético en el rotor dando lugar a la formación de los polos de la máquina. Entonces, el rotor del generador se impulsará por medio de una máquina motriz, lo cual producirá un campo magnético rotatorio dentro de la máquina.

Este campo magnético rotatorio, inducirá un sistema trifásico de voltajes dentro del *bobinado del estator o inducido* del generador.

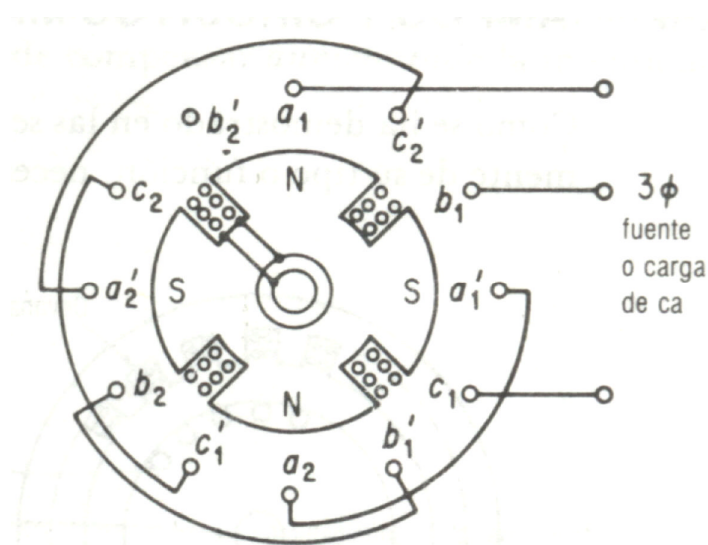


Figura 1—3 Dínamo síncrona de campo rotatorio.

El rotor del generador síncrono es esencialmente un gran electroimán, los polos magnéticos del rotor pueden ser de construcción saliente o no saliente (rotor cilíndrico).

1.2.2.1 Generador síncrono con rotor de polos salientes.

Los polos salientes son demasiado débiles mecánicamente, producen excesiva resistencia aerodinámica y ruido, por ello se los utiliza en máquinas de baja velocidad con 8 a 30 polos, que son movidos por turbinas hidráulicas (centrales hidroeléctricas). La figura 1-4 indica el modelo del generador con rotor de polos salientes.

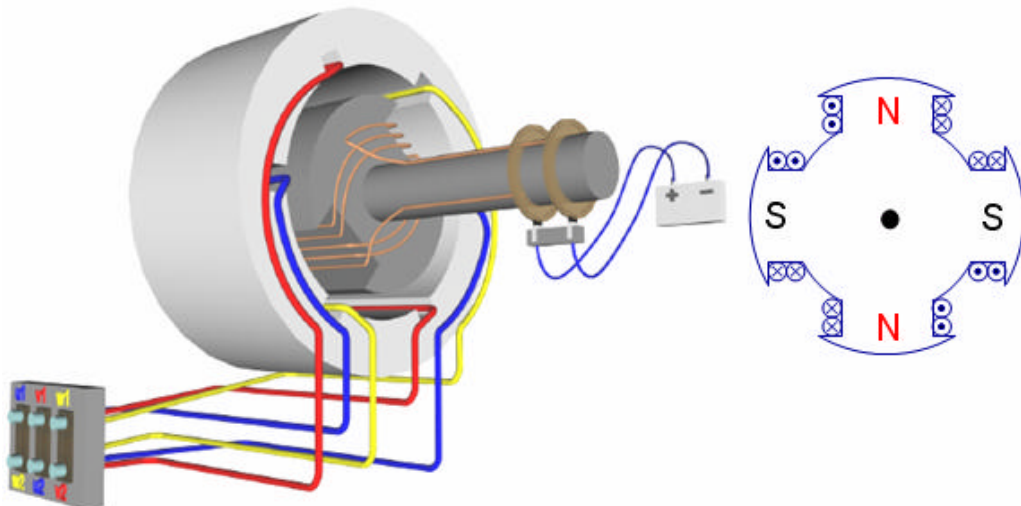


Figura 1—4 Modelo del generador síncrono con polos salientes.

Trabajan a velocidades inferiores a los 750 rpm, la longitud axial es pequeña en relación con el diámetro, se los ocupa con el eje en posición vertical.

1.2.2.2 Generador Síncrono con rotor cilíndrico.

Los rotores de polos no salientes se usan normalmente para rotores de dos y cuatro polos para máquinas alta velocidad, este tipo de rotor es impulsado por turbinas de gas o vapor de las centrales térmicas. La figura 1-5 indica la disposición de este tipo de rotor.

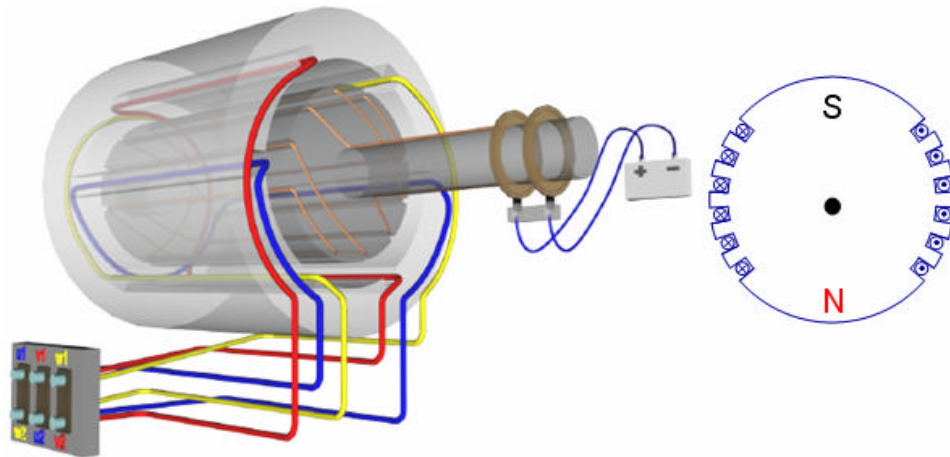


Figura 1—5 Modelo del generador síncrono con rotor cilíndrico.

Opera a velocidades de entre 1500 y 3000 rpm, la longitud axial es grande en relación con el diámetro, se encuentran montados con el eje en posición horizontal.

1.3 Principio de funcionamiento.³

El principio de funcionamiento de un generador síncrono se describe de la siguiente manera:

- Si el rotor es alimentado con corriente continua a través de anillos deslizantes, el rotor crea entonces un campo magnético B_R .
- Al girar el rotor impulsado por la máquina motriz provoca que el campo B gire a una velocidad N , el campo magnético gira a la misma velocidad del rotor.
- El campo giratorio B_R induce tensiones en el estator con una frecuencia f .
- Al conectar carga trifásica circulan corrientes trifásicas I por el devanado del estator.
- El campo giratorio originado por las corrientes del estator es el campo de reacción del inducido B_S .
- El campo resultante es la suma del campo excitador producida por el rotor y del campo de reacción del inducido $B_R + B_S$.

³ <http://endrino.cnice.mecd.es/~jhem0027/alternador/alternador.htm>

- La tensión en bornes del generador $V\phi$ es distinta a la tensión generada E_A , debido a las caídas de tensión por: las resistencias de los devanados y por la reactancia síncrona.

1.3.1 Velocidad de rotación de generador síncrono.

Los generadores síncronos son por definición *síncronicos*, lo que significa que la frecuencia eléctrica que produce esta ligada o sincronizada con la velocidad mecánica de rotación del generador.

El campo magnético del rotor se mueve según sea la dirección en que se haga girar dicho rotor. Ahora, la velocidad de rotación de los campos magnéticos de la máquina se relaciona con la frecuencia eléctrica del estator por medio de la ecuación (1.1).

$$f = \frac{PN}{60} = \frac{P\omega}{4\pi} \quad (1.1)$$

en la que: P es el número de polos

N es la velocidad en rpm (rev/min)

f es la frecuencia en hertz

ω es la velocidad en radianes por segundo (rad/s)

La potencia eléctrica se genera a 60 ó 50 Hz, según la aplicación, así que el generador debe girar a una velocidad fija que depende del número de polos de la máquina.

1.3.2 Voltaje generado internamente en un generador síncrono.⁴

Un generador sincrónico funciona en base a la *Ley de Faraday*⁵, que implica varios factores y parámetros constructivos de la máquina. La amplitud de voltaje inducido en una fase del estator es:

⁴ CHAPMAN STEPHEN, Máquinas Eléctricas, Segunda edición, McGrawHill, página 448.

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_p K_p K_d \phi f \quad (1.2)$$

donde: **N_p** es el número total de espiras por fase
 K_p es el factor de paso
 K_d es el factor de distribución
 ϕ flujo magnético total por polo
 f frecuencia en hertz

El voltaje generado depende del flujo de la máquina, de su frecuencia o velocidad de rotación y de su construcción. Esta ecuación tiene una forma más sencilla, que hace énfasis en las cantidades que se dispone durante su funcionamiento.

$$E_A = K\phi\omega \quad (1.3)$$

donde: **K** constante que representa la construcción de la máquina.
 ω es la velocidad de rotación.
 ϕ flujo magnético.

El voltaje interno inducido E_A es directamente proporcional al flujo ϕ y a la velocidad, pero el flujo en si depende de la corriente de excitación I_e que fluye en el circuito de campo del rotor.

Puesto que E_A es directamente proporcional al flujo, el voltaje generado internamente se relaciona con la corriente de campo I_e , tal como se muestra en la figura 1-6 que representa la curva característica de funcionamiento del generador en vacío.

Incluso para una corriente de excitación $I_e=0$ se inducirá una tensión debida al magnetismo remanente en el hierro.

⁵ **Ley de Faraday:** Si una espira única de conductor eléctrico se mueve relativamente dentro de un campo magnético, se crea en ella una fuerza electromotriz inducida.

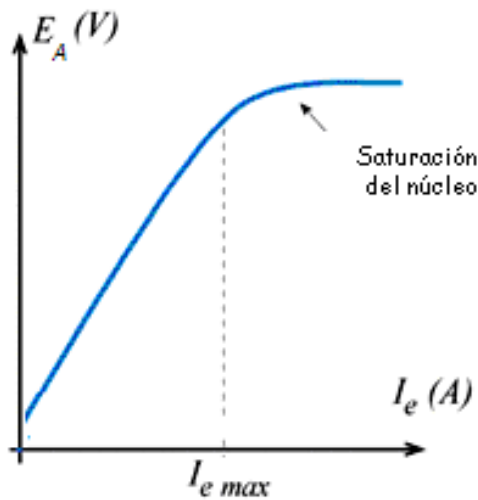


Figura 1—6 Curva característica de un generador en vacío.

Cuando empiece a aumentar la intensidad de excitación I_e , la tensión en circuito abierto E_A crecerá rápidamente, y cuando aquélla ya sea grande, los incrementos de la tensión serán mucho menores; esto debido a la permeabilidad magnética μ del hierro. Por ello, la tensión en circuito abierto crecerá linealmente al aumentar la intensidad de excitación, mientras la permeabilidad μ permanezca constante. Cuando ésta disminuya, la tensión en circuito abierto aumentará relativamente poco, aunque siga aumentando la intensidad de la corriente de excitación.⁶

1.3.3 Circuito equivalente de un generador sincrónico.

El voltaje E_A es el voltaje generado internamente y se produce en una fase del generador. Sin embargo, este voltaje E_A no es, generalmente, el voltaje que aparece en los terminales del generador. De hecho, la única vez que el voltaje interno E_A es el mismo voltaje de salida en una fase V_ϕ , es cuando no hay corriente del inducido que le llegue a la máquina, es decir cuando no existe carga conectada a los terminales del generador.

Hay varios factores que causan la diferencia entre E_A y V_ϕ :

⁶ GTZ. Electrotecnia de Potencia. Curso Superior, página 138.

dos polos que gira dentro de un estator trifásico, al que no se le ha conectado ninguna carga. El campo magnético del rotor B_R produce un voltaje generado internamente E_A en los embobinados del estator del generador, cuyo valor máximo coincide con la dirección de B_R ; con el generador en vacío, no hay flujo de corriente por el inducido y E_A será igual al voltaje de fase $V\phi$ como se observa en la figura 1-7a.

Ahora, supóngase que se conecta una carga al generador, debido a los devanados del estator, ésta es inductiva; entonces la corriente máxima estará un ángulo detrás del voltaje máximo. Este efecto se visualiza en la figura 1-7b.

La corriente que circula por el embobinado del estator produce un campo magnético propio. Este campo magnético del estator se denomina B_S y su dirección se determina por la regla de la mano derecha. El campo magnético del estator B_S produce un voltaje propio en el estator y a este voltaje se le llama E_{stat} , la figura 1-7c indica la dirección de B_S .

Con dos voltajes presentes en el embobinado del estator, el voltaje total en una fase $V\phi$ será la suma fasorial del voltaje generado internamente E_A y el voltaje de reacción del inducido E_{stat} .

$$V\phi = E_A + E_{stat} \quad (1.4)$$

El campo magnético B_{neto} , es la suma fasorial de los campos magnéticos del rotor y el estator.

$$B_{neto} = B_R + B_S \quad (1.5)$$

Como los ángulos de E_A y B_R son los mismos y los ángulos E_{stat} y B_S también, el campo magnético resultante B_{neto} coincidirá con el voltaje neto $V\phi$. Los voltajes y corrientes resultantes se muestran en la figura 1-7d.

La reacción del inducido puede interpretarse entonces como una caída de tensión debida a la circulación de corriente por el inducido, esta caída de tensión esta 90° detrás del eje de corriente y es directamente proporcional a la corriente I_A siendo X la constante de proporcionalidad; el *voltaje de reacción del inducido* puede expresarse como:

$$E_{ra} = -X I_A \quad (1.6)$$

Además de los efectos de reacción del inducido, las bobinas del estator tienen una autoinductancia L_A (su correspondiente reactancia X_A) y una resistencia R_A . El voltaje en una fase es entonces.

$$V\phi = E_A - X I_A - X_A I_A - R_A I_A \quad (1.7)$$

Los efectos de la reacción del inducido y la autoinductancia de la máquina se representan por reactancias y se acostumbra a combinarlas en una sola reactancia, conocida como *reactancia sincrónica* X_S de la máquina.

$$X_S = X + X_A \quad (1.8)$$

Por lo tanto la ecuación final que describe es:

$$V\phi = E_A - X_S I_A - R_A I_A \quad (1.9)$$

El circuito equivalente del generador se muestra en la figura 1-8, la cual ilustra una fuente de potencia de corriente continua V_F durante la alimentación del circuito de campo del rotor, representada por la inductancia de la bobina y su resistencia en serie. Hay una resistencia graduable R_{aj} , en serie con R_F , que controla el flujo de corriente de campo. El resto del circuito equivalente consiste en las representaciones de cada fase, en cada una hay un voltaje generado internamente con una reactancia sincrónica y una resistencia en serie R_A . Los voltajes y corrientes de las tres fases están desfasados 120°.

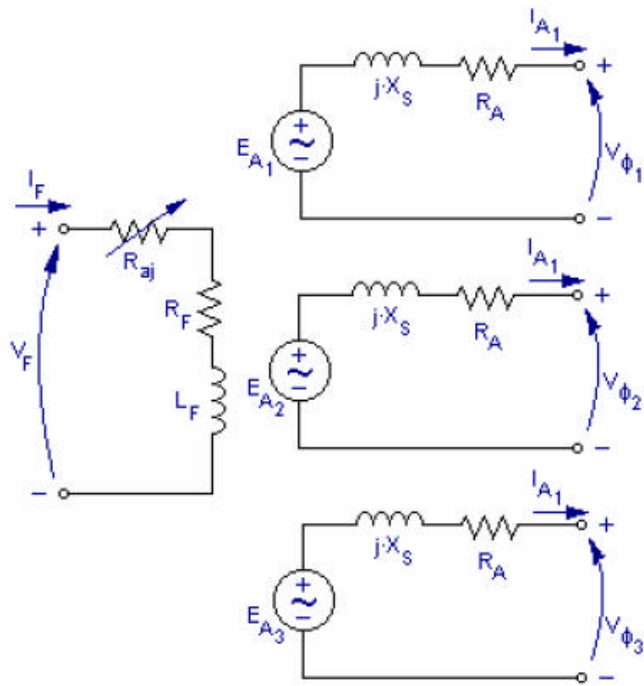


Figura 1—8 Circuito equivalente de un generador sincrónico trifásico.

Estas tres fases pueden conectarse en estrella (Y) ó en triángulo (Δ), como se indica en la figura 1-9.

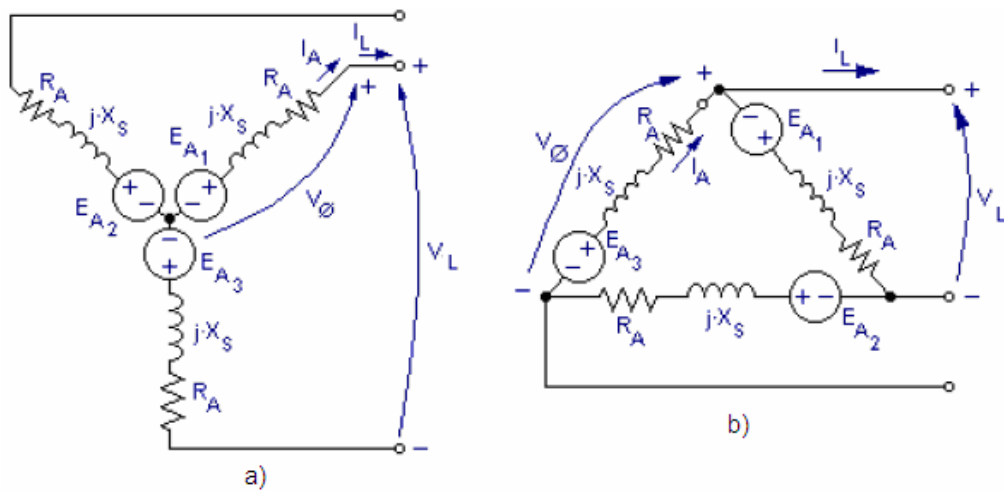


Figura 1—9 Circuito equivalente del generador, conectado en Y (a) y en Δ (b)

Si se conecta en Y, la tensión en bornes V_L que es el voltaje entre fase y fase, se relaciona con el voltaje de fase V_{ϕ} que es el voltaje entre una fase y neutro, por la expresión:

$$V_L = \sqrt{3}V\phi \quad (1.10)$$

donde: V_L es el voltaje entre dos fases.
 $V\phi$ es el voltaje entre una fase y neutro.

Si se conecta en Δ , entonces:

$$V_L = V\phi \quad (1.11)$$

Las fases del generador sincrónico son idénticas en todos sus valores, menos en el ángulo de fase cuando están conectadas en Y ; para obtener su equivalente en la conexión Δ , se obtiene su equivalente por medio de la aplicación de las ecuaciones (1.10) y (1.11).

1.3.4 Potencia y par en los generadores sincrónicos.⁷

El generador sincrónico convierte potencia mecánica en potencia eléctrica trifásica. No toda la potencia mecánica que llega al generador se vuelve eléctrica al salir de él. La diferencia existente entre la potencia de salida y la de entrada corresponden a las pérdidas de potencia del generador; en la figura 1-10 se ilustra el flujo de potencia en un generador sincrónico.

La potencia mecánica de entrada P_{ent} es la potencia en el eje del generador, y es transmitida por el motor primario que está acoplado al generador, y se expresa por:

$$P_{ent} = \tau_p \omega_m \quad (1.12)$$

donde: τ_{ap} es el torque aplicado el eje del generador
 ω_m es la velocidad angular

⁷ <http://213.97.224.22/webdocs/alus/cgs/cgs1/c5/m4ud6.pdf>

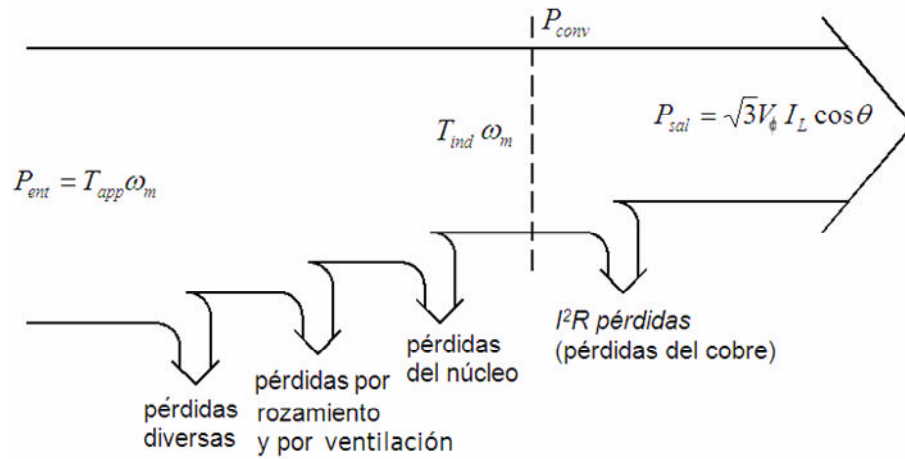


Figura 1—10 Flujo de potencia de un generador sincrónico.

La potencia se convierte de mecánica en eléctrica internamente en el generador, y esta expresada por:

$$P_e = 3E_A I_A \sin \gamma \quad (1.13)$$

donde: γ es el ángulo entre E_A e I_A

En esta transición se produce una diferencia entre la potencia de entrada P_{ent} y la potencia convertida P_{conv} , esta diferencia representa las pérdidas mecánicas del núcleo, pérdidas por rozamiento y pérdidas diversas de la máquina. La figura 1-11 describe la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida.

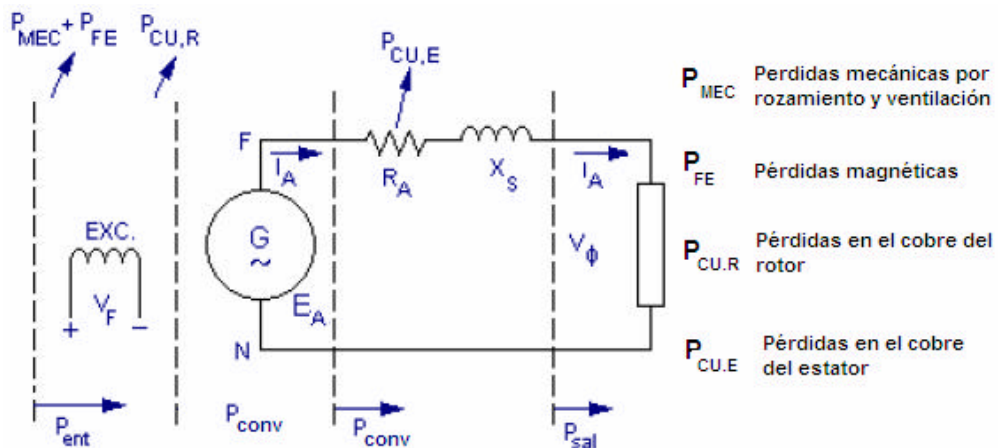


Figura 1—11 Pérdidas de potencia en un generador sincrónico.

La potencia eléctrica real que entrega el generador P_{sal} , expresada en magnitudes de fase, se indica en la expresión (1.14)

$$P_k = 3V_\phi I_A \cos \theta \quad (1.14)$$

donde: $\cos \theta$ es el *factor de potencia*⁸

La potencia eléctrica reactiva Q_{sal} generada expresada en magnitudes de fase esta dada por:

$$Q_k = 3V_\phi I_A \sin \theta \quad (1.15)$$

donde: V_ϕ es el voltaje de fase entre línea y neutro.
 I_A es la corriente de fase.

1.3.5 Determinación de los parámetros del modelo del generador sincrónico.⁹

El circuito equivalente deducido para un generador sincrónico, contiene tres cantidades que deben determinarse con el objeto de describir completamente el comportamiento de un generador sincrónico real:

1. La relación entre la corriente de campo y el flujo (y por tanto, entre la corriente de campo I_e y E_A)
2. La reactancia sincrónica.
3. La resistencia del inducido.

El primer paso es realizar el *ensayo en vacío* en el generador. Para este paso se debe desconectar la carga de los terminales del generador y conectar a éstos un voltímetro tal como indica en la figura 1-12, luego se regula a cero la corriente de

⁸ **Factor de potencia:** Relación entre la potencia real y la potencia reactiva.

⁹ <http://fing.uncu.edu.ar/catedras/archivos/electrotecnia/apuntes/MaqSincr.pdf>

excitación, este ensayo permite determinar el voltaje interno generado para cualquier corriente de campo dada, y se describe en la sección 1.3.2

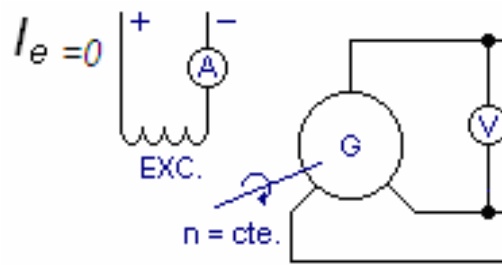


Figura 1—12 Esquema de conexiones para el ensayo en vacío.

El segundo paso en el proceso, es realizar el *ensayo de cortocircuito*. Para realizarlo se gradúa a cero la corriente de campo, y se coloca en cortocircuito los terminales del generador por medio de un amperímetro, como indica la figura 1-13a. Luego se mide la corriente de inducido I_A , a medida que se aumenta la corriente de campo I_e , en la figura 1-13b se puede observar la gráfica resultante, que es la curva característica de cortocircuito, se puede observar que I_A varía en forma lineal ante las variaciones de corriente de excitación.

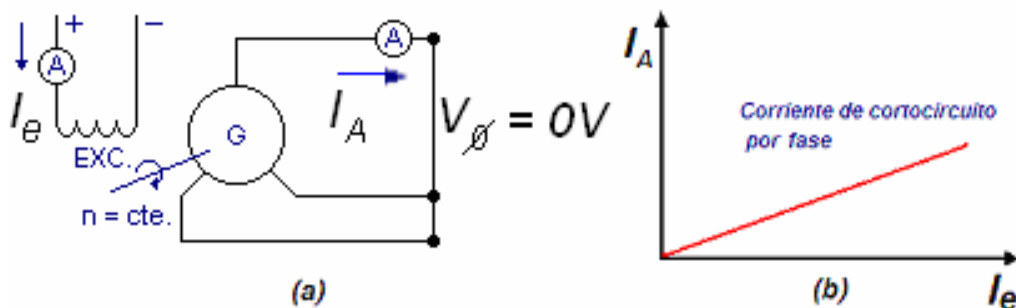


Figura 1—13 (a) Circuito equivalente del generador durante el ensayo en cortocircuito (b) Curva característica de un generador en cortocircuito.

Al poner en cortocircuito los terminales, la corriente de inducido se expresa por:

$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}} \quad (1.16)$$

Como puede verse en la figura 1-13a $V\phi$ es igual a cero, por lo tanto la impedancia interna de la máquina se obtiene mediante:

$$Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} = \frac{E_A}{I_A} \quad (1.17)$$

donde: X_S es la reactancia sincrónica.
 Z_S es la impedancia interna.

Si se asume que $X_S \gg R_A$ esta ecuación se reduce a:

$$X_S \approx \frac{E_A}{I_A} \quad (1.18)$$

El error al calcular X_S debido a ignorar el valor de R_A es insignificante, por lo tanto se acostumbra hacer el cálculo aproximado de X_S empleando la ecuación (1.18)

Por lo tanto, si se conoce E_A por medio del ensayo en vacío, e I_A con el ensayo en cortocircuito del generador, en un momento dado se puede encontrar la reactancia sincrónica X_S por medio de la ecuación (1.18)

1.4 Sistemas de excitación.

Para crear campo magnético de excitación, los devanados del rotor deben ser alimentados con corriente continua,

Existen dos métodos para obtener corriente continua:

- Suministrar al rotor la potencia de c.c. desde una fuente externa de c.c.; por medio de anillos rozantes y escobillas.
- Suministro de potencia de c.c. desde una fuente de c.a.; montada directamente en el eje del generador síncrono con un rectificador en su salida.

1.4.1 Excitatriz de corriente continua.

El procedimiento clásico consiste en utilizar un generador de c.c. autoexcitado, éste va montado en el eje del grupo generador como se indica en la figura 1-14.

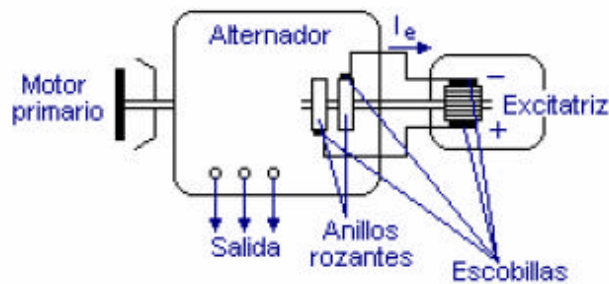


Figura 1—14 Acoplamiento de la excitatriz de corriente continua.

Los terminales de salida de la excitatriz se aplican al rotor del alternador por medio de anillos rozantes y escobillas. La figura 1-15 indica la conexión eléctrica del alternador y el generador de c.c.

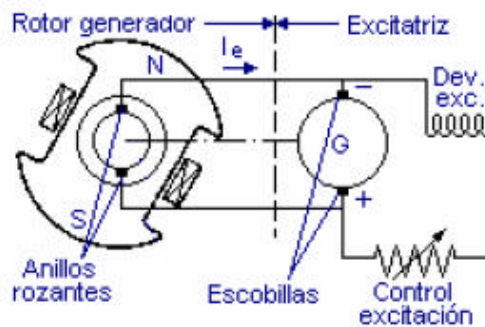


Figura 1—15 Conexión eléctrica del sistema de excitación.

Por lo general el generador de corriente continua que se utiliza tiene un tipo de *conexión en derivación*¹⁰, ya que este tipo de configuración facilita el control de corriente de campo de excitación, por medio de una resistencia variable o reóstato.

¹⁰ **Conexión en derivación:** El generador tiene una sola resistencia de campo conectada en paralelo con la resistencia de la armadura.

1.4.2 Excitatriz de corriente alterna.

Cuando las velocidades son elevadas, sobre todo en generadores grandes, hay problemas de conmutación en las excitatrices, debido a los chispazos en sus colectores. Para evitar esto, en la actualidad se emplean generadores trifásicos como excitatriz principal, éstos se construyen en el inducido del rotor con su campo de excitación situado en el estator.

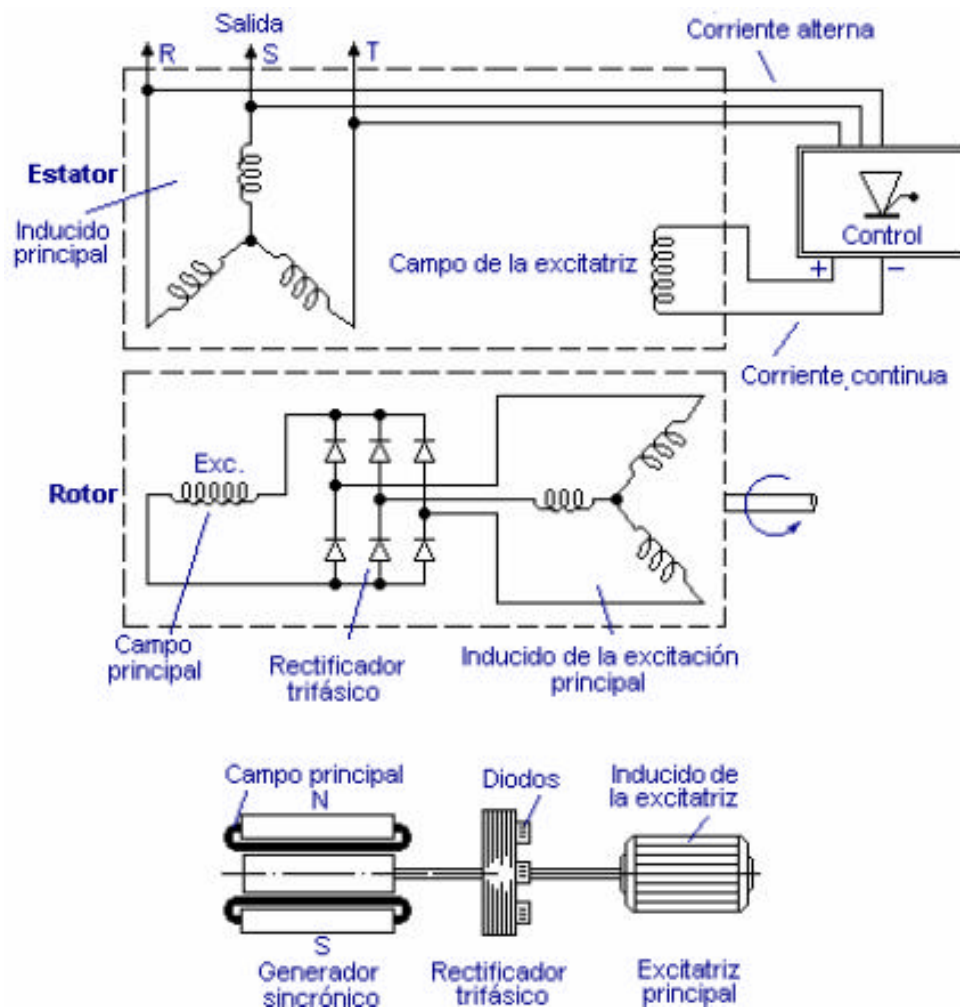


Figura 1—16 Generador con excitatriz principal.

Las corrientes trifásicas que se inducen en el rotor, se rectifican mediante rectificadores montados directamente sobre el eje. De esta manera se evita el empleo de los anillos rozantes. La disposición se indica en la figura 1-16.

1.5 Funcionamiento en paralelo de generadores.

Un sistema de energía eléctrica consiste en general de varias estaciones de generación, trabajando todas ellas en paralelo. Son numerosas las ventajas de la subdivisión de un sistema de generación en varias estaciones, tanto desde el punto de vista económico como estratégico. Las principales son:

- Varios generadores pueden alimentar más carga que uno solo.
- Teniendo varios generadores se incrementa la confiabilidad del sistema de potencia, puesto que en caso de falla de uno de ellos, no se suspende totalmente la potencia a la carga.
- El tener varios generadores funcionando en paralelo permite que se pueda desconectar uno, o más de ellos, para mantenimiento.
- Cuando se eleva la demanda promedio del sistema se puede adquirir unidades adicionales para satisfacer la nueva demanda.

1.5.1 Condiciones necesarias para la conexión en paralelo.

La figura 1-17 muestra un generador sincrónico G1 que alimenta una carga, junto con otro generador G2 que se va a conectar en paralelo con el primero, accionando el interruptor S2. Si este interruptor se cierra arbitrariamente en cualquier momento, los generadores se expondrían a graves daños, por lo tanto se deben cumplir las siguientes condiciones para poder conectarlos:

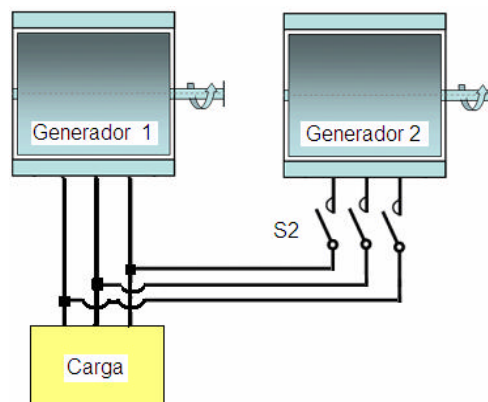


Figura 1—17 Conexión en paralelo de dos generadores.

1. La frecuencia del generador nuevo, llamado *generador entrante*, debe ser ligeramente más alta que la frecuencia del sistema en funcionamiento. Si cuando se conecten los alternadores, no son aproximadamente iguales, se presentan grandes oscilaciones de potencia hasta que los generadores se estabilicen en una frecuencia común. Las frecuencias de los dos alternadores deben ser aproximadamente iguales, pero no exactamente iguales. Deben diferenciarse en una pequeña cantidad, de tal forma que los ángulos de fase del generador entrante cambien lentamente con relación a los ángulos de fase del sistema. Esto permitirá observar el ángulo entre tensiones, y podrá cerrarse el interruptor cuando estén exactamente en fase.
2. Los voltajes de línea efectivos de los dos generadores deben ser iguales. Si los voltajes no son exactamente los mismos en cada una de las fases que se conectan entre sí, se generará un flujo de corriente muy grande cuando el interruptor se cierre.
3. Los voltajes de los dos generadores deben tener la misma secuencia de fases. Si el orden de la secuencia de fases es diferente, entonces aunque un par de tensiones estén en fase, como se ve en la figura 1-18, los otros dos pares de tensiones están, desfasados 120° ; si los generadores se conectaran en esta forma, no habría problema con la fase *a*, pero aparecerían altas intensidades por las fases *b* y *c*, dañando ambos alternadores.

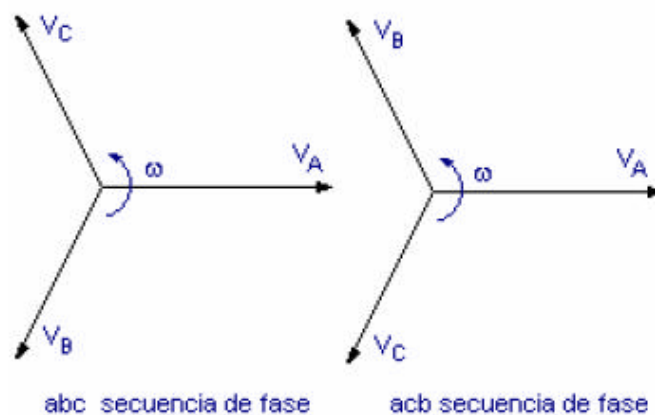


Figura 1—18 Posibles secuencias de fase de un sistema trifásico.

La condición de igualdad de secuencia de fases es una condición que puede comprobarse previamente y, una vez verificada, no existe la posibilidad de cambio alguno durante el funcionamiento del generador.

4. Igualdad de ángulos de fase; una vez que las magnitudes de voltaje y frecuencia entre el generador 1 y el generador 2 son iguales, se presenta un desfase entre los voltajes de fase idénticas; es decir entre la *fase a* del generador 1 y la *fase a* del generador 2, tal como se muestra en la figura 1-19, el mismo ángulo de desfase existe entre las otras dos fases, *b* y *c*.

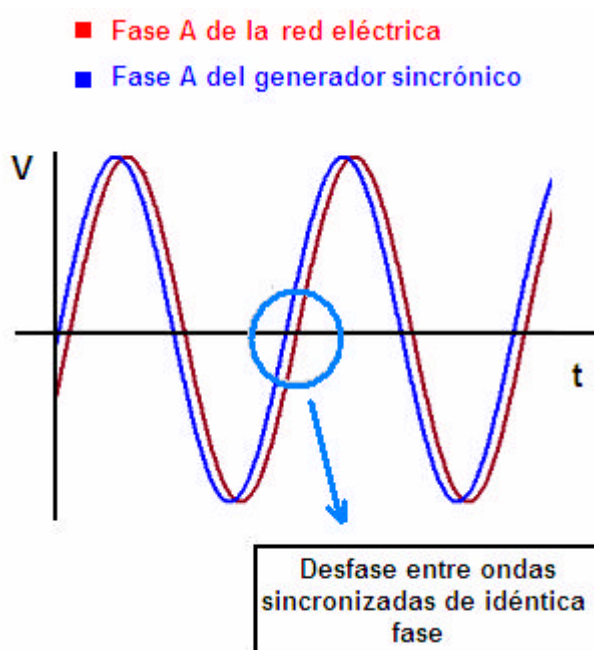


Figura 1—19 Desfase entre voltajes semejantes del Generador y la Red

Por lo tanto, se debe comprobar que el ángulo de desfase mencionado sea igual a cero, y esto se verifica cuando el voltaje entre las dos fases es igual a cero.

1.5.2 Procedimiento para la sincronización de generadores.¹¹

Primero, se lleva el generador entrante hasta una velocidad cercana a la de sincronismo, es decir se gradúa la frecuencia f_1 del generador entrante para que

¹¹ <http://endrino.cnice.mecd.es/~jhem0027/acoplamiento/acoplamiento.htm>

sea ligeramente mayor a la frecuencia del sistema f_2 , para esto se emplea un frecuencímetro al generador y otro al sistema.

Segundo, la tensión en los bornes del generador se ajusta variando la corriente de excitación I_e del generador entrante, utilizando voltímetros, hasta lograr que la tensión del generador entrante medida por el voltímetro U_2 se iguale a la tensión de línea del sistema medida por el voltímetro U_1 , indicado en la figura 1-20.

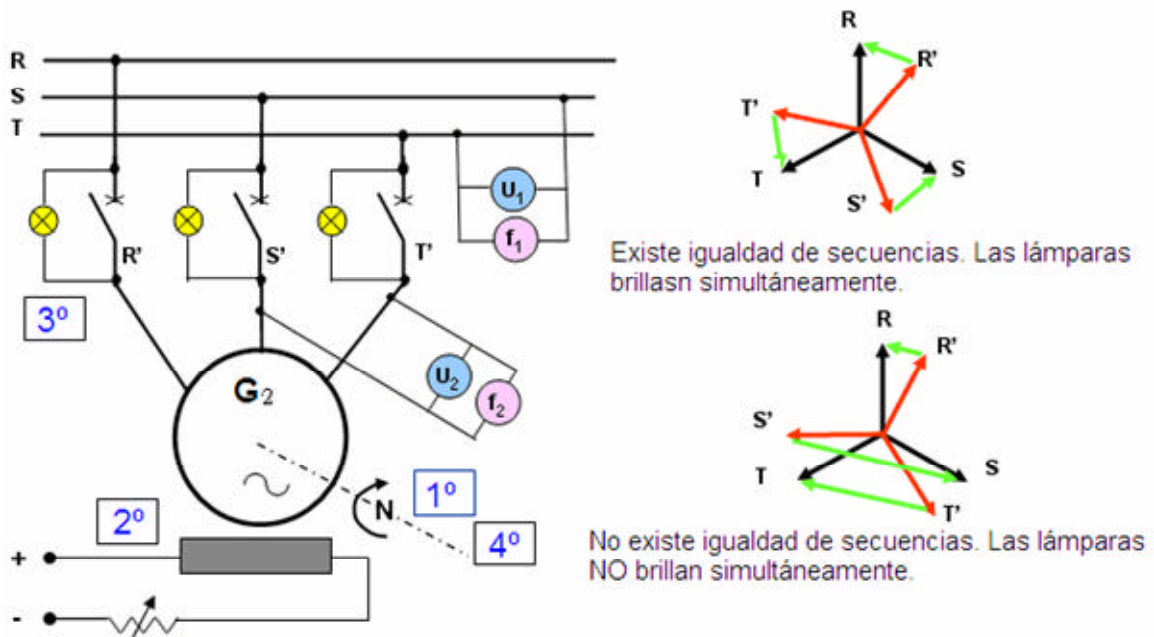


Figura 1—20 Sincronización por lámparas.

Tercero, se debe comparar la secuencia de fase del generador con la secuencia de fase del sistema. Si las secuencias difieren, el intercambio de las conexiones en dos de las tres fases del generador corrige la secuencia de fases. El intercambio debe realizarse en los terminales del generador que se va a conectar y nunca en las barras del lado de la carga, ya que el cambio de secuencia crearía muchos problemas en diferentes tipos de carga.

Para determinar la secuencia de fases se emplea un instrumento denominado *secuencímetro*, el cual se utiliza transitoriamente por una sola vez. Se puede determinar la secuencia de fases empleándose también un motor de inducción trifásico, cuyo sentido de rotación se haya verificado previamente conectándolo a las barras y luego, al generador que se va a poner en paralelo.

Otra manera de comprobar la secuencia de fase es el *método de los tres bombillos*. Con éste método se tiene tres bombillos entre los terminales abiertos del interruptor y las líneas del generador del sistema, tal como se ve en la figura 1-20. Si los tres bombillos se iluminan y apagan al mismo tiempo, entonces el sistema tiene la misma secuencia de fase. Si los bombillos se encienden sucesivamente, entonces los sistemas tienen la secuencia de fase contraria y deberá invertirse una de ellas.

Cuarto, una vez que casi se igualen las frecuencias, los voltajes en los dos sistemas cambiarán de fase entre sí muy lentamente, y se reduce el parpadeo de las lámparas; cuando los tres bombillos se apagan, la diferencia de voltaje entre ellos es cero y por consiguiente, los sistemas se encuentran en fase, y es ahí cuando se debe cerrar el interruptor de acoplamiento. Este sistema funciona pero no es muy exacto.

Un mejor sistema es emplear un *sincronoscopio*, instrumento que sirve para medir la diferencia de ángulo de fase entre fases semejantes de los dos sistemas (fase *a* del sistema con fase *a* del generador, o a su vez fases *b* con *b*, o *c* con *c*).

En la figura 1-21 se puede apreciar como varía la curva de voltaje de la fase *a*; tanto del sistema, como del generador durante el proceso de sincronización.

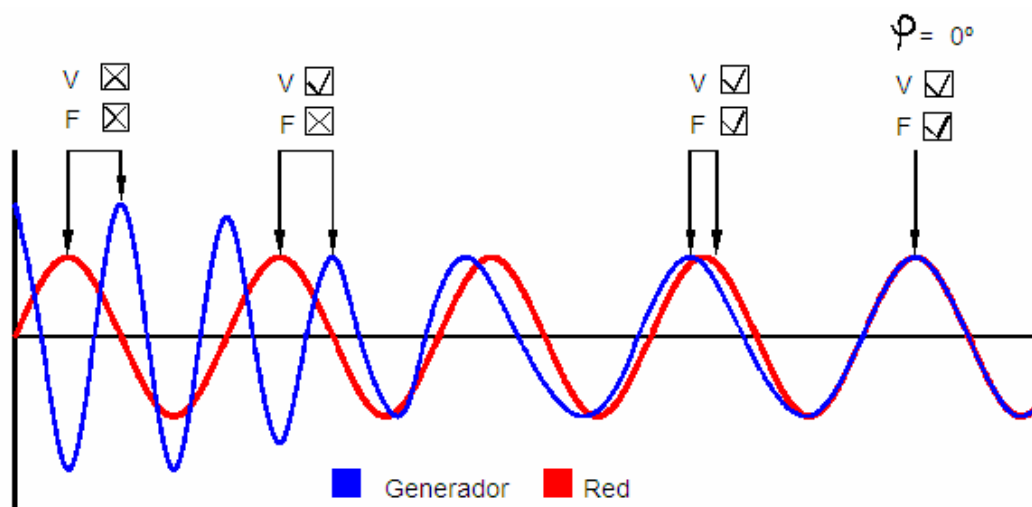


Figura 1—21 Onda de voltaje durante el proceso de sincronización de generador y red.

A continuación de la conexión en paralelo del generador se debe realizar una distribución de cargas, para lo cual se varía la intensidad de la corriente de excitación I_e del generador y la velocidad de la máquina motriz.

Si después de su conexión en paralelo se aumenta la potencia motriz del nuevo generador, éste proporcionará potencia activa a la red de suministro de energía. Entonces el rotor se adelantará al campo giratorio que aparece en el estator del generador cargado, tal como se visualiza en la figura 1-22.

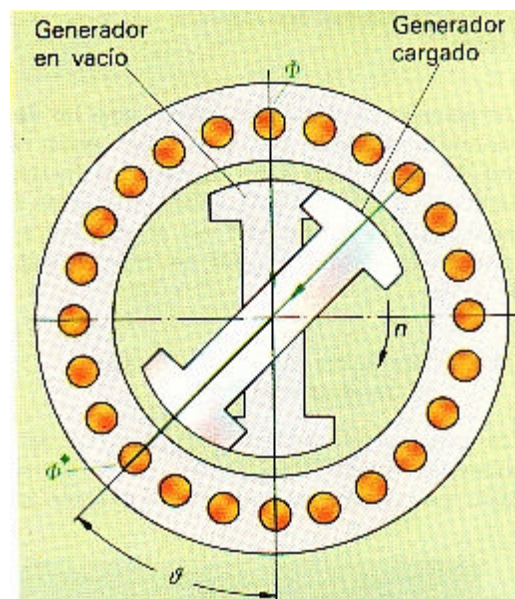


Figura 1—22 Deslizamiento interno del generador sincrónico.

El ángulo que existe entre la posición del rotor y este campo giratorio, llamado ángulo de desfase o deslizamiento interno, aumenta al crecer la potencia activa suministrada.

La potencia activa suministrada por un generador sincrónico se gobierna mediante la potencia motriz.

Una variación de la intensidad de excitación I_e tiene como consecuencia una variación de la potencia reactiva suministrada. Si después de añadir el generador a la red, ya alimentada por otros generadores, se aumenta la intensidad de excitación I_e , el nuevo alternador suministrará una potencia reactiva-inductiva a la

red. Si se redujera la intensidad I_e , el generador tomaría potencia reactiva-inductiva de la red.

La intensidad de la corriente I_e , determina el valor y el signo de la potencia reactiva suministrada por el generador.

Los generadores sincrónicos suelen tener un devanado alternador, para que la frecuencia de giro del rotor no sufra oscilaciones fuertes, cuando se produzcan variaciones bruscas de carga; este devanado equivale al inducido en cortocircuito de los motores de rotor de jaula de ardilla.

1.6 El Sincronoscopio.

Bajo las condiciones comerciales de funcionamiento sería difícil a veces, solo con los focos, decir si el alternador que entra está girando rápida o lentamente. En el laboratorio es fácil aumentar la velocidad de la máquina motriz, que generalmente es un motor de velocidad variable, y observar el parpadeo o destello de los focos o bombillas. Si el destello se desacelera al aumentar la velocidad, quiere decir que la velocidad del alternador que va a entrar, es menor que la frecuencia del sistema.

Se ha inventado un instrumento llamado *sincroscopio* o *sincronoscopio*, que contiene una aguja giratoria para indicar si la máquina que entra gira más lenta o rápidamente, y un índice fijo para indicar el instante preciso de sincronización en que se debe cerrar el interruptor de conexión en paralelo. Estos sincronoscopios se fabrican en varios diseños, que son el tipo de *aspa polarizada*, el de *hierro móvil*, y el de *bobina cruzada*.

El sincronoscopio está diseñado para funcionar en circuitos monofásicos y por lo tanto se lo puede usar para alternadores, tanto monofásicos como polifásicos. Debido a que es básicamente un dispositivo monofásico, *no puede* detectar la secuencia de fases; ésta se debe comprobar ya sea con un motor de inducción o con un secuencímetro. Tampoco puede detectar diferencia de voltaje; esto se debe hacer con un voltímetro.

Estos circuitos de sincronización sólo se emplean actualmente para potencias pequeñas y en laboratorios técnicos. En las centrales eléctricas de potencia se utilizan sincronoscopios para la sincronización a mano, aunque actualmente lo más frecuente es que existan *dispositivos de sincronización totalmente automáticos*, que conectan los generadores adicionales automáticamente y están situados generalmente en centrales de distribución de cargas, exteriores a la central generadora.

1.6.1 Sincronoscopio de aspa polarizada.

El circuito y la carátula del sincronoscopio del tipo de *aspa polarizada* se muestran en la figura 1-23a.

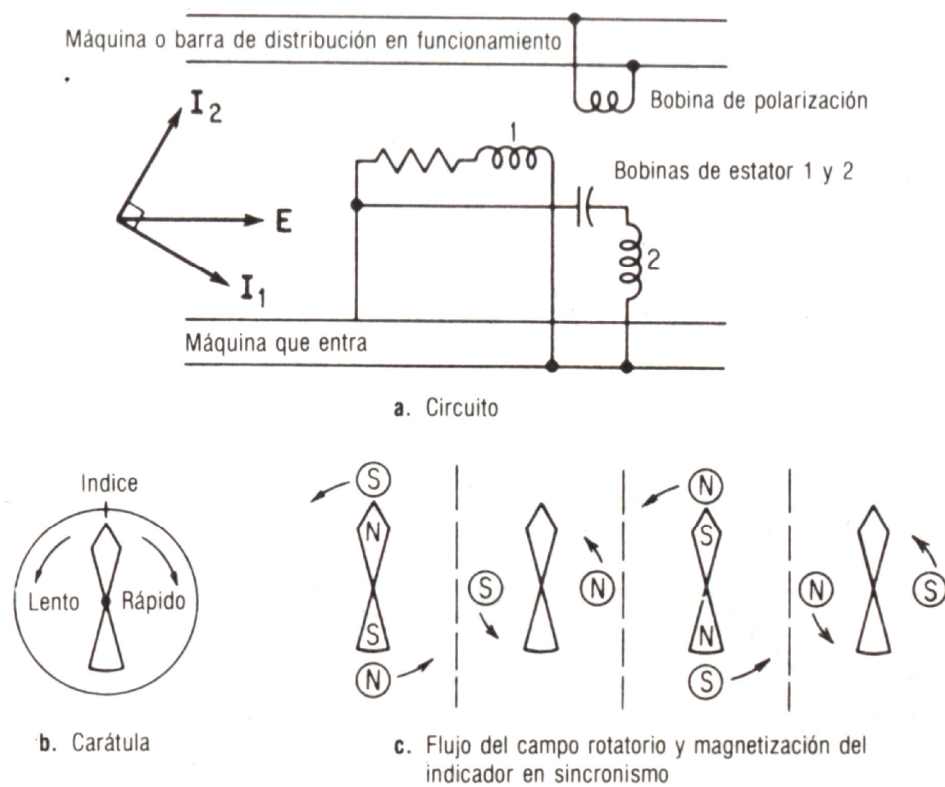


Figura 1—23 Circuito, carátula y principio de funcionamiento del sincronoscopio, del tipo de aspa polarizada.

El aspa (o puntero) está polarizada a la frecuencia de la máquina que esté trabajando mediante una bobina en el rotor. El devanado del estator consiste de dos bobinas o fases distribuidas en la circunferencia del instrumento del mismo

modo que un motor monofásico de inducción, de fase partida, y se conecta a la máquina que va a entrar. El campo rotatorio del estator gira a la frecuencia de la máquina que entra, mientras que el aspa de hierro está polarizada (magnetizada) a la frecuencia de la barra de distribución.

Cuando las frecuencias están exactamente en sincronismo, el indicador se alinearán en posición vertical fija, como se muestra en la figura 1-23b y c. En ésta última, se observa que cuando el campo giratorio está en ángulo recto con el puntero, este puntero no está magnetizado, si el indicador se magnetiza ligeramente debido a una diferencia de frecuencias, se movería lentamente a la izquierda o derecha.

Si el campo gira a 61 Hz y el aspa está magnetizada a 60 Hz, girará en sentido de las manecillas del reloj a una velocidad de 1 rps (revolución por segundo). A la inversa, si el campo gira a 58 Hz, el aspa girará en sentido contrario al de las manecillas del reloj a una velocidad de 2 rps. Cuando las dos frecuencias son idénticas, el indicador se “detiene” en una posición fija, que indica la *diferencia de fases* entre los dos voltajes de los alternadores.

1.6.2 Sincronoscopio de hierro móvil.

El sincronoscopio de hierro móvil depende de que las aspas de hierro, estén en línea con la resultante de los dos campos que giran en direcciones opuestas. Esta diferencia de campos se obtiene al conectar el devanado trifásico de la bobina de campo a las fases correspondientes, a los dos sistemas que tratan de compararse.¹²

1.6.3 Sincronoscopio de bobinas cruzadas.

En la figura 1-24 se representa el sincronoscopio de bobinas cruzadas.

¹² COSIDINE DOUGLAS M., Manual de Instrumentación Aplicada, Tomo I, página 495.

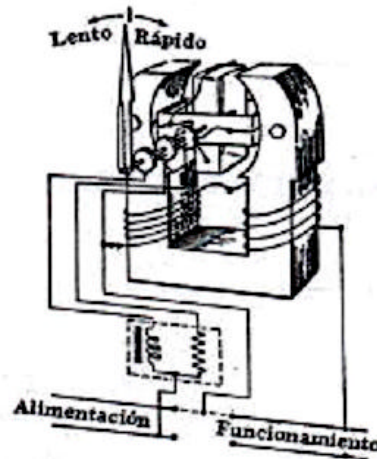


Figura 1—24 Sincronoscopio de bobinas cruzadas.

Su principio se basa en emplear un campo giratorio producido por las bobinas de la armadura, y un campo bipolar generado por la bobina de campo. Una de las bobinas del sistema móvil está alimentada por la corriente en fase, a través de una resistencia; y la otra bobina con corriente desfasada 90° en retraso que resulta de la conexión de un inductor. La bobina de campo se conecta a la fase correspondiente del sistema que trata de compararse.

1.6.4 Relé de sincronismo.¹³

Es un dispositivo cuya finalidad es sincronizar un generador con la red, o con otro generador tomado como referencia; en forma automática. Esto permite realizar la conexión en paralelo en aplicaciones de emergencia o de apoyo cuando es necesario aportar con mayor potencia al sistema.

Este dispositivo es capaz de adaptar la frecuencia del generador, mediante un algoritmo de regulación PI integrado, para proceder a su conexión en paralelo con la red eléctrica, aunque existen también modelos que poseen un potente algoritmo PID de control de la frecuencia del generador.

El control PID permite una rápida sincronización y, por consiguiente, lo hace apto para reducción de los costes en la sincronización, debido a que minimiza el

¹³ CIRCUTOR, Catálogo de productos 2007.

tiempo invertido en la misma, por ello el empleo de éste control es indicado para aplicaciones en minicentrales hidráulicas, entre otras muchas aplicaciones.



Figura 1—25 Relé de sincronismo SYNCHRO MAX.

En la figura 1-25 se aprecia el panel de operación del relé de sincronismo, en éste se pueden visualizar los parámetros: de tensión de fase y de frecuencia; tanto del generador como de la red y de sus diferencias.

1.7 Indicador de secuencia de fases.

Aunque el sincronoscopio da indicaciones con mucha exactitud, mejor que el método de los focos, del instante exacto en que se tiene sincronización; o de si el alternador que se va a conectar está girando más rápido o más lento, *no puede* indicar la secuencia de fases, lo que el método de los focos sí puede.

El circuito básico de este indicador se muestra en la figura 1-26a. Consta de dos focos, lámparas o tubos idénticos de neón con un capacitor, en la línea 2, conectados todos en estrella. La figura 1-26b muestra el circuito equivalente simplificado del indicador de secuencia de fases. Las resistencias del circuito básico (figura 1-26a) se seleccionan y diseñan de tal modo que el voltaje de fase en un caso sea *mayor* que el potencial de ignición y en el segundo caso, sea *menor* que este potencial de los focos o tubos de neón.

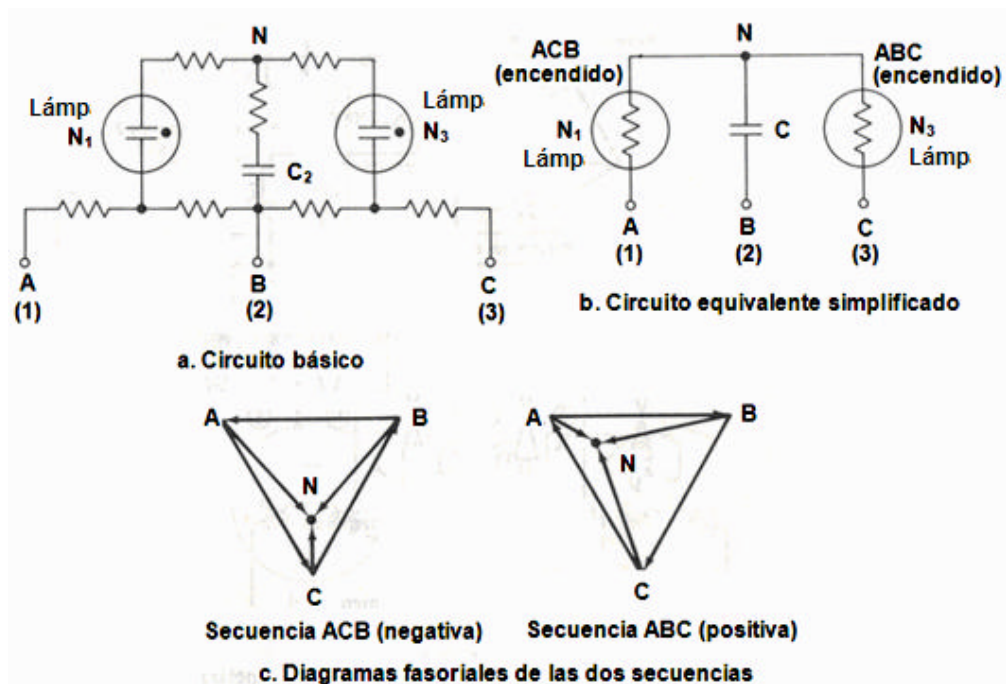


Figura 1—26 Circuito y diagrama fasorial del indicador de secuencia de fases.

Con respecto al circuito simplificado (figura 1-26b), cuando se enciende el foco de neón N1, la secuencia de fases es BACBA, lo cual sucede cuando el voltaje de fase a neutro (N) es mucho mayor que el voltaje de la fase C al neutro. Esta secuencia ACB que se llama secuencia *negativa*, se muestra en la figura 1-26c.

Capacitor en la línea	Foco encendido en	Secuencia positiva de fases	Foco encendido en la línea	Secuencia negativa de fases
B	C	BCABC	A	BACBA
A	B	ABCAC	C	ACBAC
C	A	CABCA	B	CBACB

Tabla 1—1 Funcionamiento del indicador de secuencia de fases.¹⁴

Igualmente, cuando se enciende el foco de neón N3, la secuencia de fases es BCABC, lo cual sucede cuando el voltaje de fase C al neutro (N) es mayor que el

¹⁴ Tabla tomada de IRVING KOSOW, Máquinas Eléctricas y Transformadores, Segunda Edición, página 233.

voltaje de la fase A al neutro. Esta secuencia ABC, o secuencia *positiva*, también se muestra en la figura 1-26c.

La tabla 1-1 resume la secuencia de fases en términos de los terminales de línea del indicador: A, B, C (o 1, 2, 3, respectivamente), en las que se puede ubicar al capacitor ya sea en los conductores A, B o C, respectivamente. En la figura 1-27 se indica la parte frontal de un indicador de secuencia de fases.



Figura 1—27 Indicador de secuencia de fases.

CAPITULO II

2 INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA.

2.1 Introducción.

El ser humano percibe la información del mundo que le rodea a través de sus sentidos y adquiere el conocimiento, sobre todo lo científico, cuando es capaz de cuantificar las magnitudes que percibe, es decir, a través de la medida. “La instrumentación comprende todas las técnicas, equipos y metodologías relacionadas con el diseño, la construcción y la aplicación de dispositivos físicos para mejorar, completar y aumentar la eficiencia de los mecanismos de percepción del ser humano”.¹⁵

Entre los instrumentos, son de especial interés aquellos que utilizan técnicas electrónicas para realizar la medida. Por ello, una de las tecnologías de instrumentación más avanzadas es la denominada *Instrumentación Electrónica*, que es la técnica que se ocupa de la medición de cualquier tipo de magnitud física, de la conversión de la misma a magnitudes eléctricas y de su tratamiento para proporcionar la información adecuada a un sistema de control, a un operador humano, o a ambos. La instrumentación electrónica tiene su campo de aplicación en numerosas actividades relacionadas con la ciencia y la tecnología donde la electrónica se incorporó de forma masiva. En el laboratorio y en la industria se realiza un uso intensivo de la instrumentación electrónica porque en estos entornos, como en otros muchos, es necesario medir para conocer.

¹⁵ MIGUEL A. PÉREZ, Instrumentación Electrónica, año 1971, página 1.

2.2 Sistemas de medida.

Un sistema de medida electrónico es aquel equipo cuya finalidad es obtener información acerca de un proceso físico y presentar dicha información en la forma adecuada a un observador o a otro sistema técnico de control (figura 2-1).

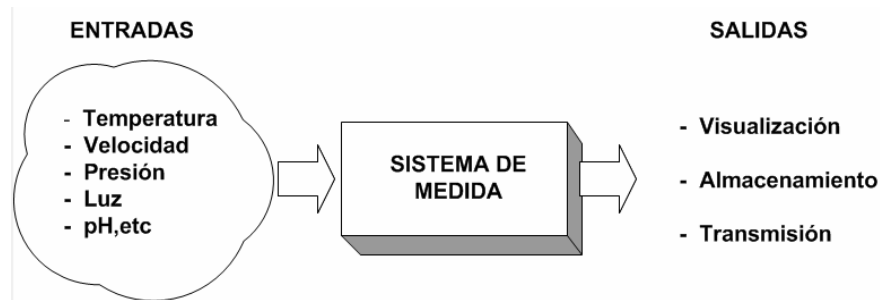


Figura 2—1 Objeto de un sistema de medida.

Existen una multitud de magnitudes físicas susceptibles de ser medidas, cada una de ellas podría considerarse dentro de los tipos de variables que muestra la tabla 2-1.

Naturaleza de la variable	Tipo de variable
Mecánica	Desplazamiento, velocidad, aceleración, fuerza, par, presión, masa, flujo, etc.
Térmica	Temperatura, calor, entropía, etc.
Magnética	Campo magnético, flujo, permeabilidad magnética, etc.
Eléctrica	Carga, corriente, tensión, resistencia, conductancia, capacidad, permitividad dieléctrica, polarización, frecuencia, etc.
Óptica	Rayos gamma, rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas, etc.
Química	Humedad, pH, concentración iónica, análisis de gases, etc.
Biológica	Proteínas, hormonas, antígenos, etc.

Tabla 2—1 Naturaleza y tipos de variables.

2.2.1 Funciones de un sistema de medida.

Considerando el sistema de medida como una caja negra, la entrada sería el valor verdadero de la variable a medir y la salida, el valor medido. Sólo en el caso ideal, la diferencia entre ambos valores será nula; por lo que siempre se cometerá un error de medida. Las causas de este error son de origen diverso: ruido del sistema de medida, interferencias exteriores, desviaciones en los parámetros de componentes, mala calibración, etc. En un sistema de medida se puede distinguir tres funciones principales: adquisición de datos, procesamiento de datos y distribución de los datos (figura 2-2).

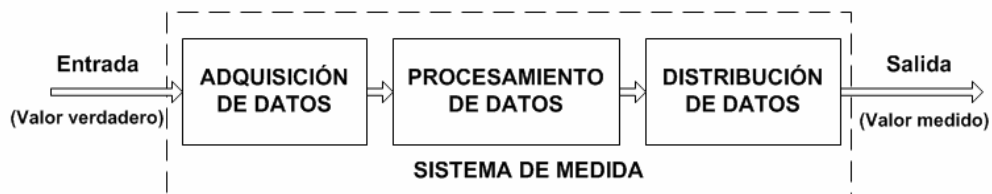


Figura 2—2 Funciones principales de un sistema de medida.

- **Adquisición de datos.** La información de las variables a medir es adquirida y convertida en una señal eléctrica. De esta etapa dependerán en gran medida las prestaciones del sistema de medida.
- **Procesamiento de datos.** Consiste en el procesamiento, selección y manipulación de los datos con arreglo a los objetivos perseguidos. Esta función suele ser realizada por un procesador digital, tipo microcontrolador o procesador digital de señal (*Digital Signal Processor* o *DSP*).
- **Distribución de datos.** El valor medido se presenta a un observador (mediante un display), se almacena (en disco o en un chip de memoria) o bien se transmite a otro sistema.

A su vez, la función de adquisición de datos puede ser dividida en unidades funcionales más pequeñas como se muestra en la figura 2-3. En primer lugar, la

variable del mundo físico es convertida en una señal eléctrica mediante un dispositivo *sensor* a fin de poder ser procesada adecuadamente. Con frecuencia, la señal procedente del sensor tiene unas características que la hacen poco adecuada para ser procesada: señal de pequeño nivel, espectro grande, falta de linealidad, etc. Se hace, pues, necesaria una etapa de *acondicionamiento de la señal*. Este acondicionamiento consiste en realizar alguna de las siguientes operaciones básicas:

- **Amplificación:** incrementar el nivel de potencia de la señal.
- **Filtrado:** eliminar las componentes de la señal no deseadas.
- **Linealización:** obtener una señal de salida que varíe linealmente con la variable que se desea medir.
- **Modulación/Demodulación:** modificar la forma de la señal a fin de poder transmitirla a largas distancias o a fin de reducir su sensibilidad frente a interferencias durante el transporte.

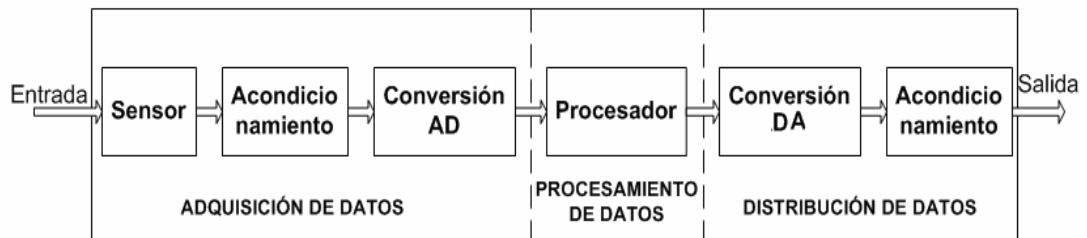


Figura 2—3 Elementos de un sistema de medida.

En un esfuerzo por simplificar el diseño, ahorrar espacio, eliminar fuentes de errores y reducir costes, los sensores suelen incluir circuitería de acondicionamiento, dando lugar a sensores integrados, que incluso proporcionan una salida digital. Después del acondicionamiento, la señal es convertida del mundo analógico al dominio digital mediante un convertidor análogo digital (ADC). La salida del ADC se procesa mediante un procesador digital de señales, que en muchas ocasiones puede integrar el ADC. Una vez procesada la señal, puede ser

necesario entregar la información en forma analógica, en cuyo caso es necesario proporcionar otra interfaz desde el dominio digital al mundo analógico mediante un convertidor digital análogo (DAC). Finalmente, la señal del procesador se puede enviar a un observador para su visualización, almacenarla en memoria o enviar a otro equipo de medida o sistema de control.

Procesar digitalmente una señal tiene sus ventajas: flexibilidad de diseño (en el sentido de poder variar por software la operación), mayor precisión que con los circuitos analógicos, las señales se almacenan más fácilmente en memoria, etc. Estas ventajas no implican que el procesado de señal digital sea siempre la solución a todos problemas de procesamiento; así, señales de gran ancho de banda que puedan requerir un procesamiento en tiempo real, necesitan un procesado analógico.

2.3 Medida de magnitudes eléctricas.

Los dispositivos y tecnologías más comunes para la medida de magnitudes eléctricas (tensión, corriente y potencia) son principalmente: resistencias shunt, transformadores de intensidad, sensores de efecto Hall, sensores magnetorresistivos y sensores de fibra óptica.

2.3.1 Resistencia Shunt.

La forma más simple de medir la corriente eléctrica es colocar una resistencia en serie con la carga y medir la caída de tensión en ella. Este método permite realizar, con bajo coste, medidas tanto en continua como en alterna.

A fin de minimizar la disipación de potencia en dicha resistencia, su valor ha de ser el menor posible, lo cual conlleva la necesidad de una amplificación, generalmente de tipo diferencial. Un inconveniente importante es la falta de aislamiento galvánico entre el circuito de potencia y el de medida, lo cual obliga al uso de amplificadores de aislamiento, encareciéndose el diseño.

La figura 2-4 muestra una sencilla alternativa para la medida de pequeñas corrientes, empleando amplificadores operacionales. Como se sabe, la tensión de salida de este circuito está dada por la expresión:

$$V_0 = R_S(1 + R_2/R_1) \quad (2.1)$$

Valores bajos de la resistencia R_S proporcionan una mayor exactitud y estabilidad térmica, y menor constante de tiempo (mayor rapidez en la medida).

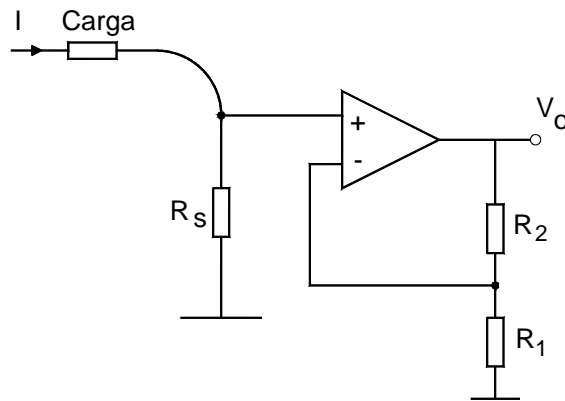


Figura 2—4 Configuración básica para la medida de corriente.

Existen soluciones integradas que permiten monitorizar la corriente por una resistencia *shunt*. Así, la figura 2-5 muestra la arquitectura interna del INA139 de Texas Instruments. La corriente a medir circula por la resistencia *shunt* R_S .

La función de transferencia del INA139 es:

$$I_0 = g_m(V_N^+ - V_N^-) \quad (2.2)$$

donde la transconductancia, g_m está dada por:

$$g_m = 0 \quad \mu A/V \quad (2.3)$$

como:

$$V_N^+ - V_N^- = I_S R_S \quad (2.4)$$

y la tensión de salida:

$$V_0 = I_0 R_L \quad (2.5)$$

la función de transferencia completa de este circuito es.

$$V_0 = [0 \quad \mu A / V \cdot I_S \cdot R_S] R_L \quad (2.6)$$

La selección de R_S depende de la aplicación, resultando ser un compromiso entre la exactitud deseada y la caída de tensión máxima permitida en la línea de medida. Valores altos de R_S proporcionan mejor precisión para corrientes más bajas, minimizando los efectos del *offset*, mientras que valores bajos de R_S minimizan la caída de tensión en la línea de alimentación.

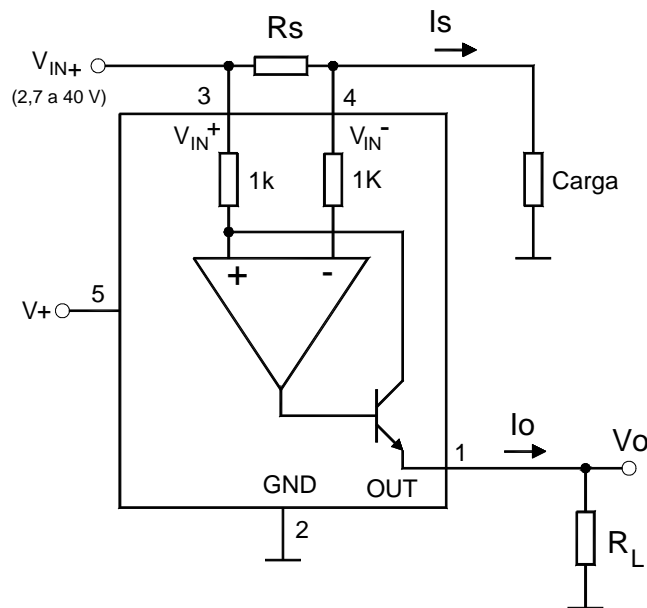


Figura 2—5 esquema interno del INA139.

Se recomienda que la tensión de entrada diferencial esté entre 50 y 100 mV (máximo 0,5 V). El valor de R_L se elige para obtener la tensión de salida de fondo de escala deseada. La impedancia de salida del 1NA139 es muy alta, lo que permite usar valores de R_L hasta 100 k Ω , con excelente exactitud.

Otro circuito integrado muy popular es el ZXCT1009 de la firma Zetex. Es un circuito de bajo coste, con una arquitectura interna igual a la del INA139, exactitud típica del 1% y ancho de banda de 300 kHz. Su función de transferencia es:

$$V_{out} = 0,0 \times I_S R_S \times R_{out} \quad (2.7)$$

En aplicaciones de bajo coste, la resistencia *shunt* R_S , se puede implementar como una pista de cobre cuando se realiza el PCB (placa de circuito impreso). La figura 2-6a muestra el circuito de aplicación y la figura 2-6b el trazo de cobre usado para implementar R_S .

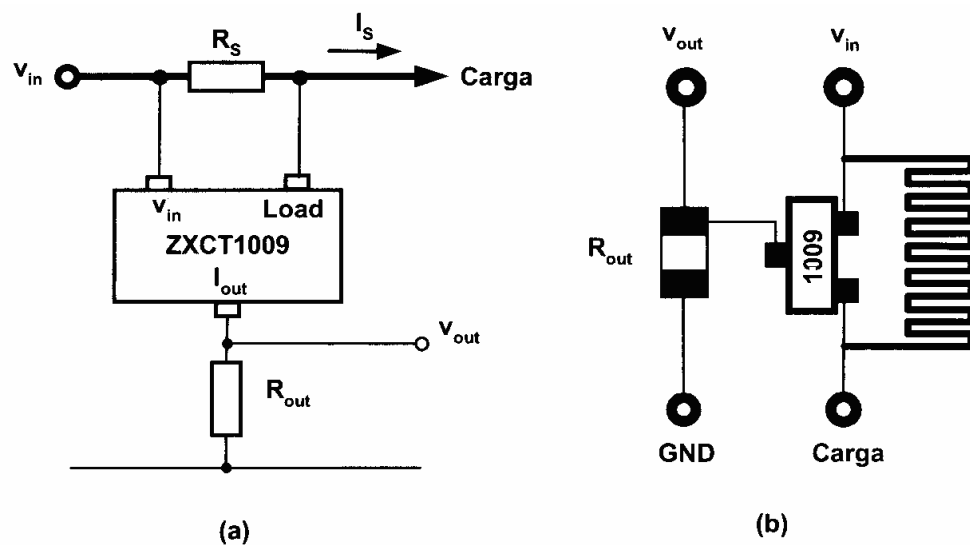


Figura 2—6 Uso del ZXCT1009 para medir corriente: (a) circuito eléctrico; (b) implementación de R_S en las pistas de cobre del PCB.

En la hoja de datos del fabricante, pueden consultarse otras aplicaciones de este circuito, entre otras aplicaciones se puede usar para monitorear corrientes bidireccionales o para protección contra cortocircuitos.

2.3.2 Transformador de intensidad.

Un transformador de intensidad permite detectar corrientes alternas, con aislamiento galvánico. Está constituido por un devanado primario (generalmente de una espira) por el que circula la corriente a medir y un devanado secundario al

que se conecta una carga que puede ser una resistencia de medida o un aparato de medida (figura 2-7a). Las principales limitaciones que presenta son que no permite medir señales continuas y que tiene un precio relativamente alto. Por el contrario, su dependencia con la temperatura es prácticamente despreciable.

En un transformador de intensidad ideal, al igual que en uno de potencia, se cumple que los amperios vuelta de los devanados primario y secundario son iguales, es decir:

$$N_P I_P = N_S I_S \quad (2.8)$$

donde la corriente por el secundario será:

$$I_S = I_P \frac{N_P}{N_S} \quad (2.9)$$

Es habitual que $N_P = 1$, con lo que la corriente primaria se verá reducida en el secundario por el número de vueltas del devanado secundario, N_S . La expresión (2.9) será tanto más válida cuanto menor sea la corriente de vacío o de excitación, para lo cual se emplean materiales de alta permeabilidad magnética. Se define la *relación de transformación nominal* k_n , como el cociente entre los valores eficaces de las intensidades nominales primaria y secundaria:

$$K_n = \frac{I_{Pn}}{I_S} \quad (2.10)$$

La corriente de excitación da lugar a dos tipos de errores: *el error de relación* ε , definido como el error que el transformador introduce en la medida de una corriente, debido a que la relación de transformación real no es igual a la relación de transformación nominal.

$$\varepsilon = \frac{K_n I_S - I_P}{I_P} \times 100 \quad (2.11)$$

Y el *error de fase* δ , definido como la diferencia de fase entre los vectores de las corrientes primaria y secundaria (figura 2-7b).

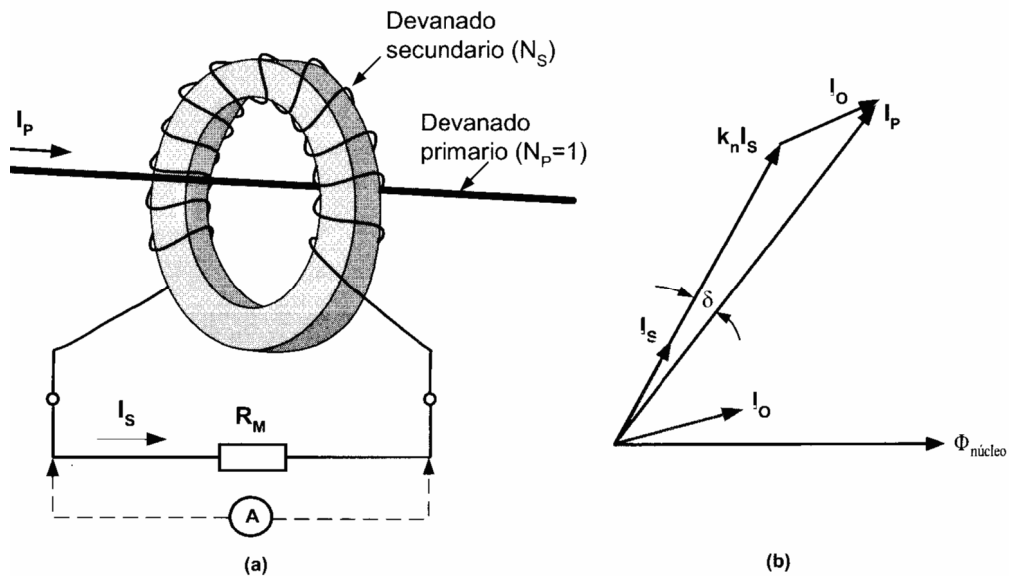


Figura 2—7 Transformador de corriente: (a) construcción; (b) diagrama vectorial.

Las características más importantes para seleccionar un transformador de intensidad son principalmente las que se describen a continuación:

- **Corriente nominal primaria:** Se elige en función de la corriente a medir. Los valores normalizados para transformadores dedicados a alimentar aparatos de medida son: 10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 A.
- **Corriente nominal secundaria:** Las salidas normalizadas son 1 y 5 A. También es posible tener una salida 4 - 20 mA para control de procesos.
- **Clase de precisión:** Se define como el error de relación máximo, para la intensidad primaria nominal y la carga de precisión. Las clases de precisión normales son: 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 3.
- **Carga de precisión:** Es el valor de la carga que garantiza las especificaciones de precisión anteriores. Se suele expresar por su valor en ohmios y su factor de potencia, o por la potencia aparente (VA) que consume al ser atravesada por la corriente secundaria nominal.

Nunca debe dejarse el secundario en circuito abierto, ya que toda la corriente primaria pasa a ser corriente de excitación, produciendo la saturación magnética del núcleo y dando lugar a la aparición de una tensión en los terminales del secundario, que puede ocasionar fallos en el aislamiento del transformador, además de ser un peligro para el usuario. Por tanto, si por algún motivo hay que desconectar la carga, se tiene que “puentear” el secundario.

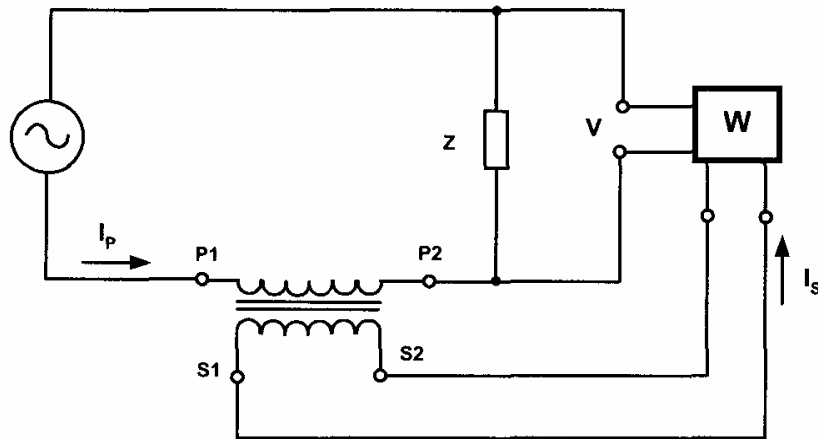


Figura 2—8 Medición de potencia usando un transformador de intensidad.

La figura 2-8 muestra el conexionado de un transformador de intensidad para la medida de la potencia eléctrica de un sistema. Hay que fijarse en el sentido del conexionado de los terminales del transformador, ya que si se cambia el terminal S1 por el S2, la corriente en el secundario estaría desfasada 180° y la lectura del vatímetro sería incorrecta.

2.3.3 Sensores de efecto Hall.

Estos dispositivos permiten monitorear tanto señales continuas como alternas, proporcionando aislamiento galvánico entre el circuito de medida y el de potencia.

2.3.3.1 Sensor Hall de corriente.

La medida de corriente puede realizarse en lazo abierto o en lazo cerrado. A partir de los datos indicados por la tabla 2-2, se puede afirmar que la medida en lazo cerrado aporta una mejoría en todas las características técnicas: exactitud,

linealidad y *deriva*¹⁶. Esto se debe a que integra un circuito de compensación que mantiene nulo el flujo magnético en el núcleo, con lo que se elimina la influencia de las no linealidades del núcleo y se reducen los efectos de la temperatura en el elemento Hall.

Característica	Medida de corriente en lazo abierto	Medida de corriente en lazo cerrado
Margen de medida	0 - 18000 A	0 - 15000 A
Ancho de banda	0 - 25 KHz	0 - 200 KHz
Exactitud a 25°C	+/- 1%	+/- 0.5%
Linealidad	+/- 0.5%	+/- 0.1%
Tiempo de respuesta	< 3 - 7 μ s	< 1 μ s
Margen de temperatura	- 25 a + 70 °C	- 40 a + 85 °C

Tabla 2—2 Comparación de sensores Hall de corriente.

La figura 2-9 muestra tres versiones comerciales de sensores Hall de corriente: para montaje en PCB, núcleo sólido y núcleo partido.

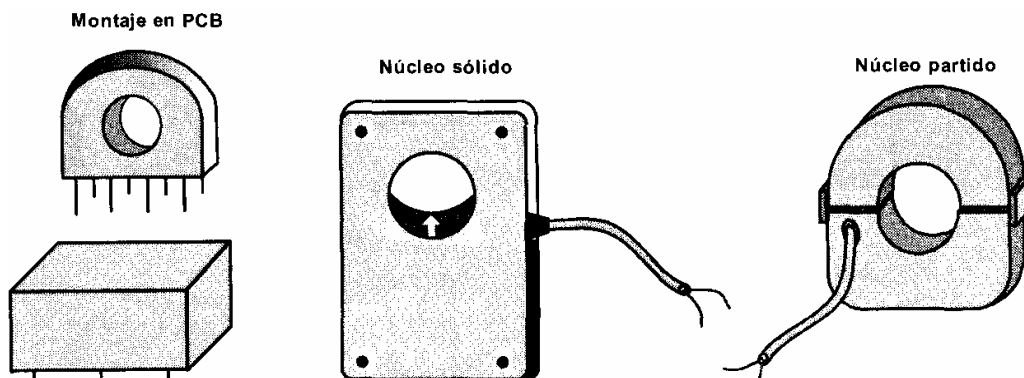


Figura 2—9 Formas constructivas de sensores Hall de corriente.

El de núcleo partido se utiliza para aplicaciones de sustitución, donde no sea posible desconectar el cable del primario. Los dispositivos para montaje en PCB¹⁷ pueden llevar un orificio para que pase el conductor por el que circula la corriente.

¹⁶ **Deriva:** Variaciones a largo plazo, generalmente provocadas por el envejecimiento del sensor.

¹⁷ Placa de Circuito Impreso.

La mayoría de las versiones admiten múltiples vueltas del primario, con el objeto de poder incrementar la sensibilidad de la medida.

La salida puede ser en corriente (figura 2-10a) o en tensión (figura 2-10b); en el caso de salida en corriente, ésta se mide sobre una resistencia exterior R_M cuyos valores máximos y mínimos suelen venir dados por el fabricante. Las corrientes de salida típicas son 25, 50 y 100 mA para entradas nominales de 25, 50 y 100 A, respectivamente.

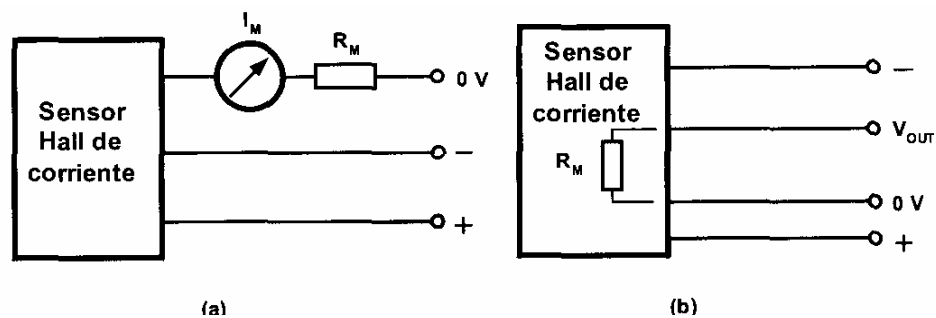


Figura 2—10 Conexiones típicas de un sensor Hall de corriente (a) salida en corriente (b) salida en tensión.

También son frecuentes las versiones con salidas 4-20 mA, de forma tal que cuando la corriente de entrada sea nula, la salida tome el valor de 4 mA y cuando esté pasando la corriente máxima, la salida sea de 20 mA.

La salida en tensión puede ser unipolar 0 - 10V, idóneas para su uso con amplificadores de instrumentación y medidores de panel, o bien bipolar -10 a +10V, apropiada para aplicaciones donde sea necesario el control de corrientes alternas.

2.3.3.2 Sensor Hall de tensión.

La medida de tensión mediante sensores Hall está basada en el mismo principio que la medida de corriente; de hecho, el sensor Hall de tensión está constituido por un sensor de corriente. La principal diferencia está en el circuito primario, en el que se ha aumentado el número de espiras, de forma que la corriente primaria sea baja, con un consumo mínimo en el circuito de medida.

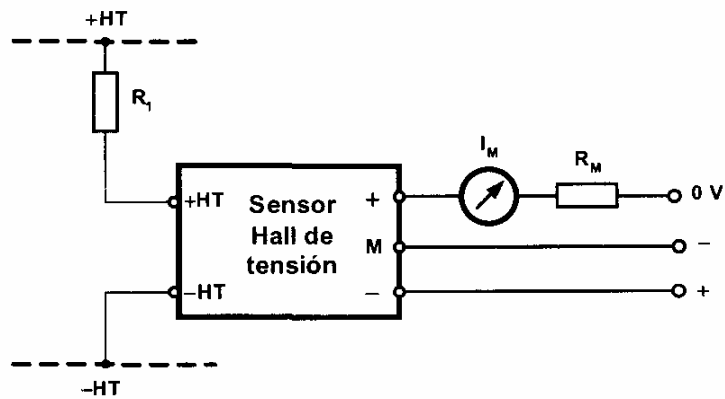


Figura 2—11 Conexión típica de un sensor Hall de tensión.

Para medir una tensión, es suficiente llevar al sensor una corriente primaria equivalente mediante una resistencia en serie con el devanado primario. La figura 2-11 muestra dicha conexión para el caso del sensor Hall de tensión. La resistencia R_1 puede estar integrada en el propio dispositivo.

2.3.3.3 Medida de la Potencia Eléctrica.

La potencia eléctrica disipada por una carga en un circuito de corriente continua se obtiene como el producto de la tensión y de la corriente, es decir:

$$P_L = V_L \times I_L \quad (2.12)$$

En el caso de señales alternas, la potencia eléctrica disipada está dada por el producto de los valores instantáneos. En circuitos alimentados por señales periódicas interesa medir la potencia activa P , definida como el valor medio de la potencia instantánea:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.13)$$

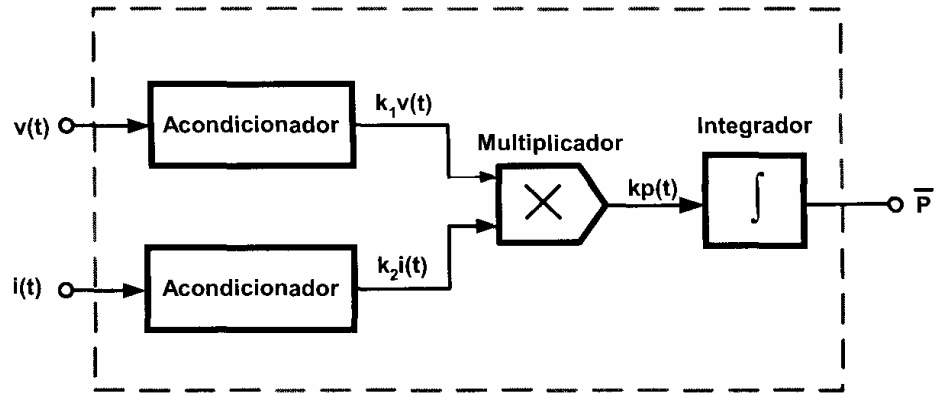


Figura 2—12 Diagrama de bloques de una medida de potencia activa.

El cálculo de la expresión 2.13 puede hacerse mediante el esquema de la figura 2-12, en el que se acondicionan las señales de corriente y tensión, se multiplican sus valores y se calcula su valor medio mediante un integrador.

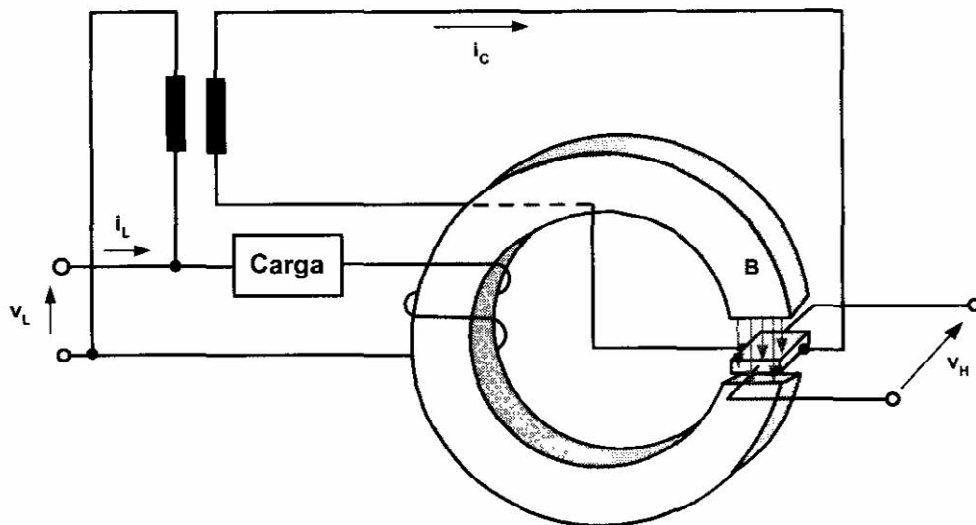


Figura 2—13 Medida de la potencia eléctrica basada en el efecto hall.

Es posible realizar un multiplicador basado en el efecto Hall. La figura 2-13 muestra el principio de funcionamiento utilizando esta técnica. El campo magnético B , es proporcional a la corriente que circula por la carga i_L , es decir:

$$B(t) = K_1 i_L(t) \quad (2.14)$$

La corriente de control del sensor Hall i_C es proporcional a la tensión de línea:

$$i_C(t) = K_2 V_L(t) \quad (2.15)$$

La tensión Hall está dada por:

$$V_H(t) = K_H i_C(t) B(t) \quad (2.16)$$

Donde: K_H es la constante de Hall.

Por tanto, el valor instantáneo de la tensión Hall será:

$$V_H(t) = K_H V_L i_L(t) \quad (2.17)$$

Por lo tanto, la tensión Hall es proporcional a la potencia en la carga. Esta señal analógica puede ser procesada para obtener la potencia media o activa.

2.3.4 Sensores Magnetorresistivos.

Tanto los sensores de efecto Hall, como los magnetorresistivos (MR) requieren la presencia de un campo magnético, las principales diferencias entre estos dos tipos de sensores de corriente son:

- Los MR son más sensibles (unas 200 veces) que los sensores de efecto Hall, si bien su linealidad es peor. Esta linealidad se mejora sustancialmente mediante una técnica de compensación similar a la empleada por los sensores Hall de corriente en lazo cerrado.
- Los MR tienen un ancho de banda mayor: entre 1 y 15 MHz, frente a unos 200 kHz de los sensores Hall.
- En los sensores Hall, el eje sensible es perpendicular al plano del chip; en cambio, en los MR, el eje sensible es paralelo al plano del chip.
- Ambas tecnologías son compatibles con las tecnologías de fabricación de circuitos integrados.

Los sensores MR internamente se suelen presentar por un puente de Wheatstone, con dos o cuatro MR; en cada rama del puente las MR tienen sensibilidad opuesta a la acción del campo magnético, lo que permite reducir su dependencia con la temperatura, así como la influencia de campos magnéticos externos.

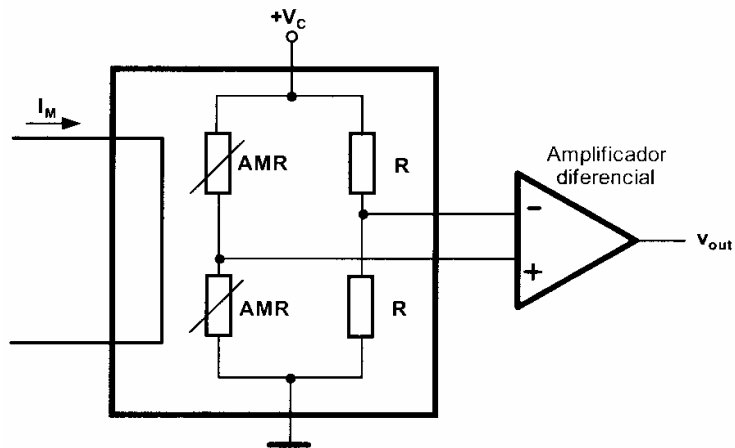


Figura 2—14 Estructura interna de un sensor de corriente MR.

La corriente eléctrica (continua o alterna) puede ser medida con un sensor MR, mediante la detección del campo magnético que dicha corriente crea. La figura 2-14 muestra un ejemplo de sensor magnetorresistivo AMR de la firma Zetex, en el que la corriente a medir I_M , circula por un conductor en el interior del chip. La salida del puente se amplifica y filtra para dar una tensión de salida proporcional a la corriente a medir. Este fabricante dispone de modelos con corrientes de fondo de escala de 5, 10 y 20 A y un ancho de banda de 100 kHz.

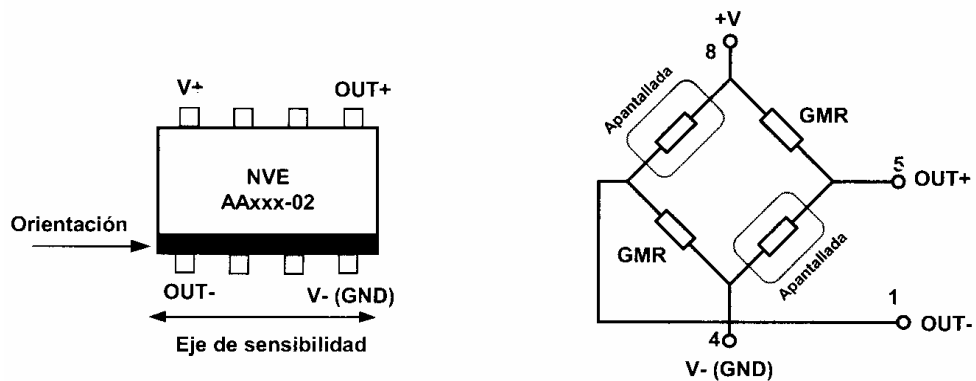


Figura 2—15 Distribución de pines y diagrama de bloques del sensor GMR de la serie AAO02 de NVE.

Los sensores magnetorresistivos del tipo GMR permiten obtener variaciones de resistencia mayores (entre un 4 - 20%), obteniéndose un nivel de salida mayor que con los AMR. La configuración típica de un sensor GMR es la de un puente de Wheatstone con cuatro resistencias GMR, de las cuales dos son sensibles al campo y las otras dos están apantalladas.

La figura 2-15 muestra un ejemplo de sensor GMR, de la firma NVE Corporation, la tensión de salida máxima es del orden de 0.3V, por lo que suele ser necesaria una amplificación posterior.

2.3.5 Sensores de fibra óptica.

Los sensores de *fibra óptica*¹⁸ para monitorear señales eléctricas son una consecuencia de las características específicas de la fibra óptica: no son conductores, tienen poco peso (lo que facilita su aislamiento y montaje), no presentan histéresis y poseen una buena respuesta en frecuencia. Son particularmente interesantes en aplicaciones de alta tensión o en presencia de interferencias electromagnéticas; y donde la velocidad y estabilidad sean características importantes.

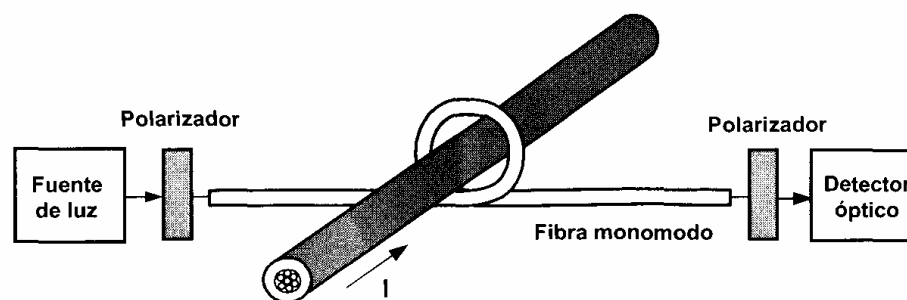


Figura 2—16 Sensor óptico de corriente.

La figura 2-16 muestra un sensor de corriente basado en la modulación de la intensidad óptica. La corriente I que circula por el conductor, induce un campo magnético, el cual, en virtud del efecto Faraday, rota el plano de polarización de la

¹⁸ **Fibra óptica:** Es un filamento transparente conductor de energía de naturaleza óptica (*no conduce energía eléctrica*), el principio en el que se basa la transmisión de luz es el la reflexión interna.

luz, modulando la intensidad de la luz transmitida de forma proporcional al campo magnético y, por tanto, a la corriente a medir.

A continuación se extraen los principales aspectos de las tecnologías consideradas para sensor magnitudes eléctricas.

	Resistencia shunt	Transformador de corriente	Sensor de efecto hall	Sensor magneto-resistivo	Sensor de fibra óptica
Coste	Muy bajo	Medio	Alto	Alto	Medio
Linealidad	Muy buena	Media	Media	Media	Buena
Capacidad de medir corrientes altas	Muy pobre	Buena	Buena	Baja	Muy buena
Consumo	Alto	Bajo	Medio	Bajo	Medio
Variación de la salida con la temperatura	Media	Baja	Alta	Media	Baja
<i>Offset</i>	Sí	No	Sí	Sí	No
Histéresis y saturación	No	Sí	Sí	Sí	No

Tabla 2—3 Comparación de tecnologías para la medida de corriente eléctrica.

La tabla 2-3 reúne las características principales que deben ser tomadas en cuenta al momento de elegir el sensor; éste deberá ajustarse a la aplicación en la que se va a emplear dicho sensor.

2.4 Microcontroladores.¹⁹

Un microcontrolador, es un dispositivo electrónico encapsulado en un chip, capaz de ejecutar un programa. El microcontrolador reúne en un solo integrado:

¹⁹ José Manuel Sánchez Sánchez, Control de un espectroradiómetro miniaturizado, Proyecto de tesis, Escuela Politécnica de Catalunya, 25 de febrero de 2005.

microprocesador, memoria de programa, memoria de datos y puertos de entrada/salida. Además, suelen disponer de otras características especiales como: puertos serie, comparadores, convertidores análogo-digitales, etc.

Un microcontrolador ejecuta instrucciones. Este conjunto de instrucciones es lo que se denomina programa. Las instrucciones son leídas de la memoria de programa para ejecutarlas una a continuación de otra.

Programar un microcontrolador consiste en introducir el programa en la memoria del microcontrolador, las instrucciones son operaciones como sumar, restar, escribir en un puerto, activar un bit de un dato, etc. Mediante estas instrucciones básicas se puede realizar operaciones más complejas y así llegar al objetivo de la aplicación.

Los microcontroladores Microchip Technology, es decir los PIC están muy extendidos actualmente en el mercado gracias a su gran variedad y bajo coste. Otra razón del éxito de los PIC es su utilización, ya que una vez que se ha aprendido a utilizar uno, conociendo su arquitectura y juego de instrucciones; es muy fácil emplear otro modelo diferente.

2.4.1 Arquitectura de los PIC.

La arquitectura tradicional se basa en el esquema propuesto por John Von Neumann (figura 2-17), en el cual la unidad central de proceso, o CPU, esta conectada a una memoria única que contiene las instrucciones del programa y los datos.



Figura 2—17 Arquitectura Von Neumann.

Las dos principales limitaciones de esta arquitectura tradicional son:

- La longitud de las instrucciones esta limitada por la unidad de longitud de los datos; por lo tanto, el microcontrolador debe hacer varios accesos a memoria para buscar instrucciones complejas.
- La velocidad de operación (o ancho de banda de operación) esta limitada por el efecto de cuello de botella, que significa un bus único para datos e instrucciones, que impide superponer ambos tiempos de acceso.

Otro tipo de arquitectura es la conocida como Harvard, consiste en un esquema en el que el CPU esta conectado a dos memorias por intermedio de dos buses separados. Una de las memorias contiene solamente las instrucciones del programa, y es llamada Memoria de Programa. La otra memoria solo almacena los datos y es llamada Memoria de Datos, esta disposición se ilustra en la figura 2-18.

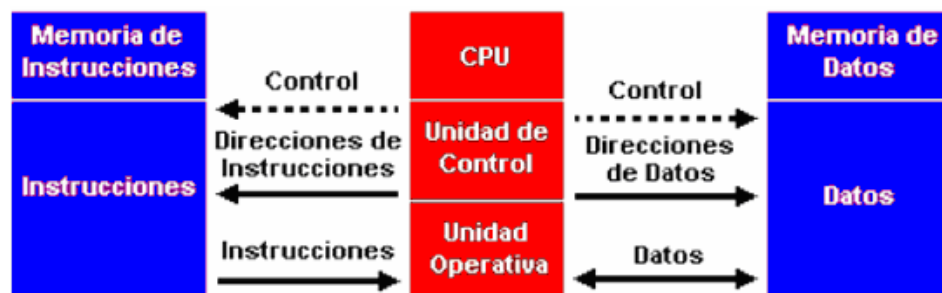


Figura 2—18 Arquitectura Harvard.

Ambos buses son totalmente independientes y pueden ser de distintos anchos de banda. Para un procesador de Set de Instrucciones Reducido, o RISC (Reduced Instrucción Set Computer), las instrucciones y el bus de la memoria de programa pueden diseñarse de manera tal que todas las instrucciones tengan una sola posición en la memoria de programa. Además, como los buses son independientes, el CPU puede estar accediendo a los datos para completar la ejecución de una instrucción, y al mismo tiempo estar leyendo la próxima instrucción a ejecutar.

Las principales ventajas de esta arquitectura son:

- El tamaño de las instrucciones no está relacionado con el de los datos, y por lo tanto puede ser optimizado para que cualquier instrucción ocupe una sola posición de memoria de programa, logrando así mayor velocidad y menor espacio en la memoria de programa.
- El tiempo de acceso a las instrucciones puede superponerse con el de los datos, logrando una mayor velocidad de operación.

Una pequeña desventaja de los procesadores con arquitectura Harvard, es que deben poseer instrucciones especiales para acceder a tablas de valores constantes que pueda ser necesario incluir en los programas.

2.4.2 El procesador.

El procesador o CPU es el elemento más importante del microcontrolador y determina sus principales características, tanto a nivel de hardware como de software.

Se encarga de direccionar la memoria de instrucciones, recibir la instrucción en su curso, su decodificación y la ejecución de la operación que implica dicha instrucción, así como la búsqueda de los operandos y el almacenamiento del resultado.

Existen tres orientaciones en cuanto a la arquitectura o funcionalidad de los procesadores actuales.

- *CISC* (Computadores de Set de Instrucciones Complejo). Disponen de más de 80 instrucciones máquina en su repertorio, algunas de las cuales son muy sofisticadas y potentes, requiriendo muchos ciclos para una ejecución.
- *RISC* (Computadores de Set de Instrucciones Reducido). En estos procesadores el repertorio de instrucciones es muy reducido y las instrucciones son simples y, generalmente, se ejecutan en un ciclo.
- *SISC* (Computadores de Set de Instrucciones Específico). En los microcontroladores destinados a aplicaciones muy concretas, el juego de

instrucciones, además de ser muy reducido, es “específico”; es decir, las instrucciones se adaptan a las necesidades de la aplicación prevista.

2.4.3 Organización de la memoria.

Los PIC, al estar contruidos con arquitectura Harvard, poseen dos bloques de memoria distintos, una para la memoria de programa y otra para la de datos.

Estas dos memorias son independientes entre ellas teniendo tamaño y longitudes de palabra distintas. Cada bloque posee su propio bus, de tal forma que el acceso a cada uno puede producirse durante el mismo ciclo del oscilador.

2.4.3.1 Memoria de datos.

La memoria de datos esta dividida en dos áreas. Una de ellas corresponde al banco de Registro de Propósito General (GPR), y la otra dedicada a los Registros de Funciones Especiales (SFR), que controlan los recursos y periféricos del microcontrolador. Las dos áreas están repartidas en Bancos, que se seleccionan mediante ciertos bits destinados a ese propósito que se hallan en el Registro de Selección de Banco (BSR). Cuando se realiza un acceso a una posición situada fuera de los bancos. Se ignoran los bits del BSR.

2.4.3.2 Memoria de programa.

Se le conoce también como memoria de instrucciones. Aquí es donde se guarda el programa del usuario.

Existen diferentes tipos de memorias de programa dependiendo de las necesidades, un caso particular son los PIC con memoria tipo flash. Este tipo de memoria se puede programar y borrar eléctricamente alrededor de 1000 veces.

La cantidad de memoria también depende del tipo de PIC que se esté utilizando, para gamas bajas y programas simples se disponen de microcontroladores PIC

con menos memoria y para proyectos de mayor envergadura existen PIC con mayor memoria de programa.

2.4.4 Descripción del PIC18F452.²⁰

Los microcontroladores PIC 18F452 del fabricante Microchip, poseen arquitectura Harvard, es un microcontrolador de 16 bits ²¹, tiene una memoria de datos de 1536 bytes, 256 bytes de memoria EEPROM, una memoria de programa de 16384 Instrucciones, la memoria de programa se puede direccionar hasta 32KB.

El PIC18F452 esta disponible en varios formatos de encapsulado, siendo el encapsulado tipo DIP de 40 pines el más empleado en montajes de circuito impreso, la figura 2-19 describe el encapsulado DIP del PIC18F452.

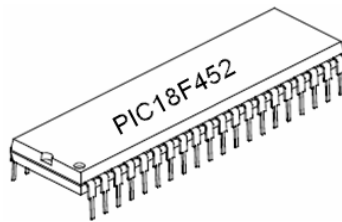


Figura 2—19 Encapsulado DIP del PIC18F452.

Un dato importante en todos los componentes es la distancia entre los pines que poseen, en los circuitos es de vital importancia este dato; así, en este tipo el estándar se establece en 0,1 pulgadas (2,54 mm).

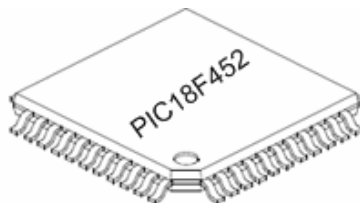


Figura 2—20 Encapsulado TQFP del PIC18F452.

²⁰ MICROCHIP. Data Sheet PIC18F452.

²¹ Tamaño máximo de palabra de instrucción.

La figura 2-20 muestra el encapsulado tipo TQFP, éste se emplea en técnicas de *montaje superficial*²², la distancia entre pines es de 1.27 mm.

2.4.4.1 Oscilador.

Todos los microcontroladores disponen de un circuito oscilador, que genera una onda cuadrada de alta frecuencia, el mismo que configura los impulsos de reloj usados en la sincronización de datos de todas las operaciones del sistema.

Generalmente, el circuito de reloj está incorporado en el microcontrolador y solo se necesitan unos pocos componentes exteriores para seleccionar y estabilizar la frecuencia de trabajo. Dichos componentes suelen consistir en un cristal de cuarzo junto a elementos pasivos, o bien un resonador cerámico o una red RC.

El PIC18F452 se puede usar con 8 diferentes modos de configuración del oscilador, permitiendo al usuario obtener una amplia gama de opciones para el desarrollo de proyectos; en la tabla 2-4 se describe cada uno de estos modos de osciladores.

Oscilador	Descripción
LP	Cristal de bajo consumo
XT	Cristal / resonador
HS	Cristal de alta velocidad / resonador
HS+PLL	Cristal de alta velocidad / resonador con PLL habilitado
RC	Red R-C externa (Resistencia - Capacitor)
RCIO	Red R-C externa con pin E/S habilitado
EC	Reloj externo
ECIO	Reloj externo con pin E/S habilitado

Tabla 2—4 Tipos de osciladores.

²² **Tecnología de Montaje Superficial:** *SMT (Surface Mount Technology)* es el conjunto de procesos usados para soldar componentes de montaje superficial en una tarjeta de circuito impreso.

Para ocupar el modo de oscilación HS, XT y PL, el cristal u oscilador cerámico debe conectarse en los pines OSC1 y OSC2, tal como lo muestra la figura 2-21; RS se puede usar para evitar la sobrealimentación con cristales de corte AT, RF varía según el modo de oscilación elegido, cuando se trabaja debajo de 3 V_{DD}, puede ser necesario usar el modo HS.

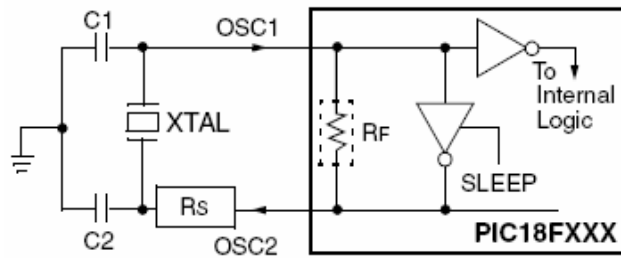


Figura 2—21 Conexión para operación en modo HS, XT ó PL.

En la tabla 2-5 se puede apreciar los valores recomendados para C1 y C2, además de la frecuencia de trabajo para cada modo de operación. Una alta capacitancia incrementa la estabilidad del oscilador, pero también incrementa el tiempo de arranque.

Tipo de oscilador	Frecuencia	C1	C2
LP	32.0 KHz	33 pF	33 pF
	200 KHz	15 pF	15 pF
XT	200 KHz	22 - 68 pF	22 - 68 pF
	1.0 MHz	15 pF	15 pF
	4.0 MHz	15 pF	15 pF
HS	4.0 MHz	15 pF	15 pF
	8.0 MHz	15 - 33 pF	15 - 33 pF
	20.0 MHz	15 - 33 pF	15 - 33 pF
	25.0 MHz	15 - 33 pF	15 - 33 pF

Tabla 2—5 Selección de capacitores para oscilador de cristal.

Aumentar la frecuencia de reloj supone disminuir el tiempo en que se ejecutan las instrucciones, pero lleva aparejado un incremento del consumo de energía.

La configuración de oscilación EC y ECIO, requieren una fuente de reloj externa que debe ser conectada en el pin OSC1. Cuando se opera con el modo de oscilación EC, la frecuencia de oscilación dividida para 4 se encuentra disponible en el pin OSC2, esta señal puede ser usada para propósitos de prueba o para sincronizar otra lógica, la figura 2-22 muestra la configuración.

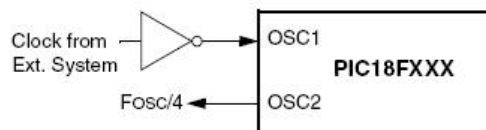


Figura 2—22 Configuración con reloj externo para modo EC.

El modo de oscilación ECIO funciona de igual manera que el modo EC, con la diferencia que el pin OSC2 vuelve a ser un pin de E/S salida de propósito general; es decir, el bit 6 del PUERTO A (RA6) vuelve a ser un pin de E/S, la figura 2-23 muestra la conexión de pines para este modo de oscilación.

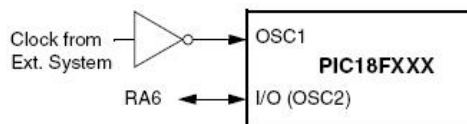


Figura 2—23 Configuración con reloj externo para modo ECIO.

En el PIC 18F452 la fuente del reloj alternada es el oscilador Timer1. Si un cristal de frecuencia baja (32 kHz, por ejemplo) se conecta al oscilador Timer1, si este se ha habilitado, el dispositivo puede cambiar al modo de operación de bajo consumo de potencia.

2.4.4.2 Puertos de Entrada/Salida.

El PIC18F452 tienen disponible cinco puertos de entrada/salida de usos general, llamados *PUERTO A*, *PUERTO B*, *PUERTO C*, *PUERTO D* y *PUERTO E*, cada

pin de un puerto representa un bit; cada pin puede ser multiplexado con funciones periféricas específicas del dispositivo, en la tabla 2-6 se muestra la función de cada pin, y la descripción para el encapsulado tipo DIP, se muestra en la figura 2-24.

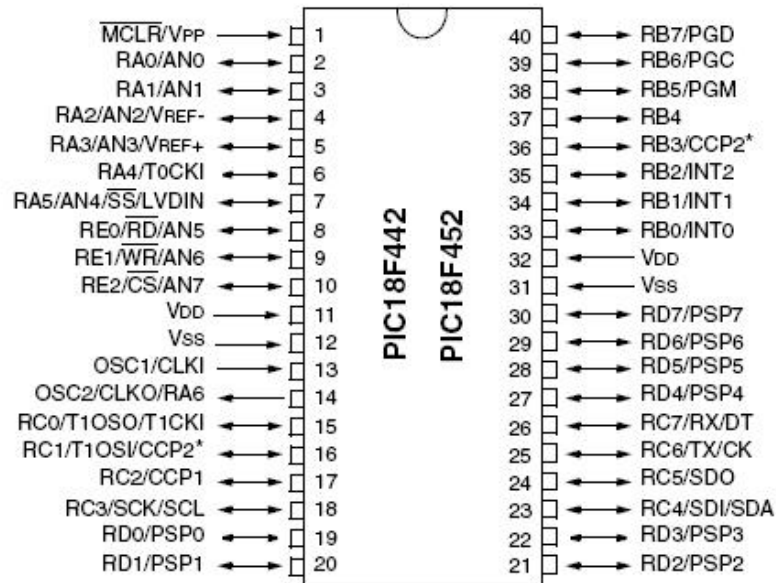


Figura 2—24 Diagrama de pines del PIC18F452.

Cada puerto consta de tres registros de operación:

- El registro *TRIS*, que determina la dirección del puerto (0 = salida, 1 = entrada).
- El registro *PORT*, que lee los niveles lógicos en los pines del puerto.
- El registro *LAT*, funciona alternativamente y de forma similar al *PORT* y se usa para leer-cambiar los valores en los pines E/S que se están manejando.

PIN	DESCRIPCION
OSC1/CLKI (13)	Entrada para el cristal oscilador externo / entrada fuente de reloj externo.
OSC2/CLKO/ RA6 (14)	Este pin debe conectarse al cristal o resonador cuando se usa modo XT / En modo de red RC por este pin se obtiene un tren de pulsos o reloj cuya frecuencia es 1/4 de OSC1/ además es un pin de E/S de propósito general.

MCLR/VPP (1)	MCLR es el pin de reset del microcontrolador, también se usa como entrada o pulso para grabación al momento de programar el dispositivo.
RA0/AN0 (2)	Puede actuar como línea digital de E/S / como entrada analógica del conversor AD (canal 0).
RA1/AN1 (3)	E/S digital / entrada análoga (canal1).
RA2/AN2/VREF- (4)	Puede actuar como línea digital de E/S / como entrada analógica del conversor AD (canal 2) / como entrada para voltaje de referencia negativo.
RA3/AN3/ VREF+ (5)	Puede actuar como línea digital de E/S / como entrada analógica del conversor AD (canal 3) / como entrada de voltaje de referencia positivo.
RA4/T0CKI (6)	Línea digital de E/S, colector abierto si el pin es configurado como salida / entrada de reloj externo para Timer0.
RA5/AN4/SS/ LVDIN (7)	Línea digital de E/S / entrada analógica (canal 4) / entrada par selección como esclavo del modulo SPI ²³ / detector de bajo voltaje.
RB0/INT0 (33)	Puerto B pin 0 bidireccional / Este pin puede ser la entrada para solicitar una interrupción externa (Interrupción0).
RB1/INT1 (34)	Puerto B pin 1, bidireccional / Interrupción externa (Interrupción1).
RB2/INT2 (35)	Puerto B pin 2, bidireccional / Interrupción externa (Interrupción2).
RB3/CCP2 (36)	Puerto B pin 3, bidireccional / Captura2 (entrada), compara2 (salida) PWM2 (salida).
RB4 (37)	Puerto B pin 4, bidireccional. Puede programarse como petición de interrupción cuando el pin cambia de estado.
RB5/PGM (38)	Puerto B pin 5, bidireccional. Puede programarse como petición de interrupción cuando el pin cambia de estado / entrada de voltaje bajo para programación ICSP ²⁴ .
RB6/PGC (39)	Puerto B pin 6, bidireccional. Puede programarse como petición de interrupción cuando el pin cambia de estado / En programación ICSP recibe la señal de reloj.

²³ **SPI:** Periférico de interfase serial, está diseñado para que se conecte un dispositivo maestro y un esclavo (comunicación punto a punto).

²⁴ **ICSP:** (*In Circuit Serial Programing*). Técnica que permite la programación del dispositivo en circuito.

RB7/PGD (40)	Puerto B pin 7, bidireccional. Puede programarse como petición de interrupción cuando el pin cambia de estado / En programación ICSP actúa como entrada de datos.
RC0/T1OSO/ T1CKI (15)	Línea digital de E/S / salida del oscilador del timer 1 / como entrada de reloj externo para timer1/timer3.
RC1/T1OSI/ CCP2 (16)	Línea digital de E/S / entrada al oscilador timer1 / módulo captura 2 (entrada), comparación 2 (salida) PWM 2 (salida).
RC2/CCP1 (17)	E/S digital / También puede actuar como (entrada) captura 1, (salida) comparación 1 (salida) de PWM 1.
RC3/SCK/SCL (18)	E/S digital / E/S de reloj comunicación serie síncrona SPI / E/S de reloj para comunicación serie síncrona I2C ²⁵ .
RC4/SDI/SDA (23)	E/S digital / entrada de datos comunicación SPI / I/O datos en comunicación I2C.
RC5/SDO (24)	E/S digital / salida de datos en modo SPI.
RC6/TX/CK (25)	E/S digital / pin de transmisión comunicación USART asíncrono / como reloj de comunicación síncrona.
RC7/RX/DT (26)	E/S digital / Receptor comunicación USART asíncrono / como datos en comunicación síncrona.
RD0/PSP0 a RD7/PSP7 (19, 20, 21, 22, 27, 28, 29, 30)	Los ocho pines de este puerto pueden actuar como E/S digitales o como líneas para la transferencia de información en la comunicación del puerto de datos paralelo esclavo.
RE0/RD/AN5 (8)	E/S digital / señal de lectura para la puerta paralela esclava / entrada analógica canal 5.
RE1/WR/AN6 (9)	E/S digital / señal de escritura para la puerta paralela esclava / entrada analógica canal 6.
RE2/CS/AN7 (10)	E/S digital / señal de activación/desactivación de la puerta paralela esclava / entrada analógica canal 7.
VSS(12, 31)	Referencia (Tierra).
VDD(11, 32)	Fuente positiva (5V).

Tabla 2—6 Descripción de pines del PIC 18F452.

²⁵ **I2C:** Es un protocolo de comunicación serial de dos hilos, está diseñado para que se pueda conectar varios dispositivos a una misma tarjeta electrónica (comunicación multipunto).

La corriente proporcionada por el PIC no es muy grande, de modo que muchas veces hay que amplificarla si se quiere actuar directamente sobre dispositivos de mucho consumo.

2.4.4.3 Conversores A/D.

Un conversor análogo digital tiene como entrada un nivel de voltaje (valor analógico) y produce en su salida un número binario de n bits, proporcional al nivel de la entrada (valor digital). Los conversores de señal análogo digital se abrevian ADC o A/D.

Uno de los parámetros que definen al A/D es la *resolución* como la mínima variación de voltaje en la entrada que produce cambio del valor digital en la salida. Por ejemplo un conversor de 10 bits tiene un total de 2^{10} valores (1024 valores de, 0 a 1023).

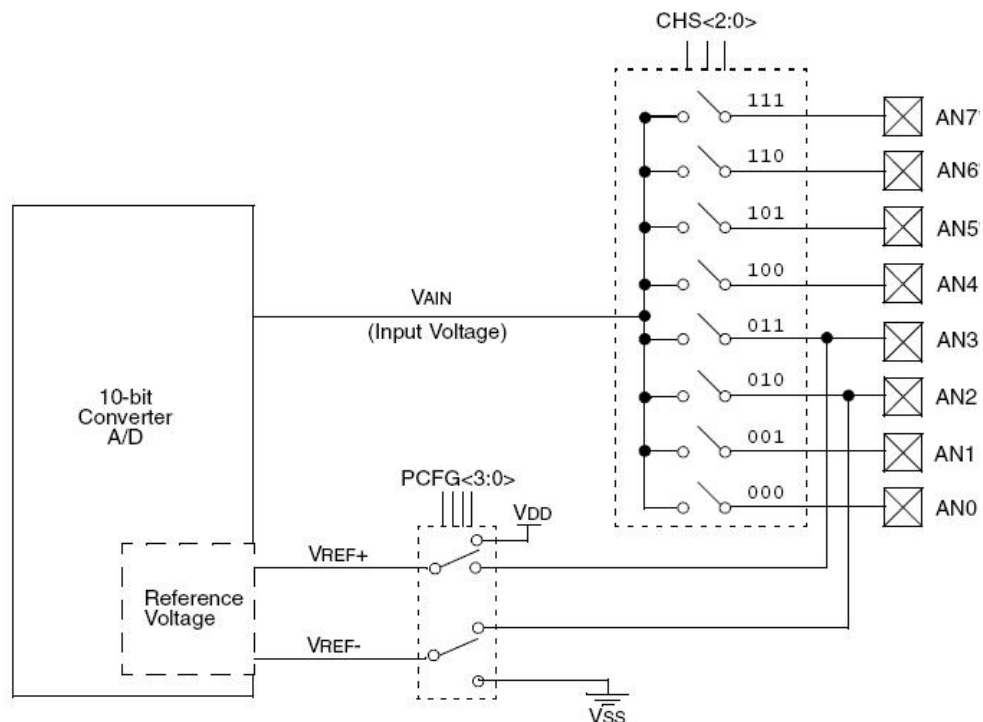


Figura 2—25 Diagrama de bloques del conversor A/D.

El módulo conversor análogo digital (A/D) del PIC 18F452 tiene 8 canales de entrada. La conversión de la señal analógica aplicada (a uno de los canales) se plasma en número binario de 10 dígitos. El módulo A/D necesita voltajes de

referencia, puede seleccionarse las tensiones VDD, VSS del microcontrolador o puede emplear tensiones aplicadas a los pines RA2 o RA3 (incluso es posible establecer combinaciones de los anteriores valores). En la figura 2-25 se muestra el diagrama de bloques del módulo A/D del PIC18F452.

Cada puerto asociado con el pin del conversor A/D puede ser configurado como entrada análoga o como E/S digital. Para configurar los pines como entrada análoga se usa los registros *ADCON0*, *ADCON1*, *TRISA* y *TRISE*.

El módulo A/D puede seguir operando durante el modo *SLEEP*, esto requiere que el reloj A/D sea una red RC. Cuando el reloj RC es seleccionado, el módulo A/D espera un ciclo de instrucción antes de empezar la conversión. Esto le permite a la instrucción *SLEEP* ser ejecutada eliminando todos los ruidos digitales producidos por el switcheo en la conversión.

2.4.4.4 Temporizadores y contadores.

Se emplean para controlar periodos de tiempo (temporizadores) y para llevar la cuenta de acontecimientos que suceden en el exterior (contadores).

Para la medida de tiempos, se carga un registro con el valor adecuado y a continuación dicho valor se va incrementando o restando al ritmo de los impulsos de reloj, o algún múltiplo, hasta que se desborde y llegue a 0, momento en el que se produce un aviso.

Cuando se desean contar acontecimientos que se materializan por cambios de nivel o flancos en alguno de los pines del microcontrolador, el mencionado registro se va incrementando o restando al ritmo de dichos impulsos.

Generalmente, los contadores tienen una capacidad de entre 8 y 16 bits, de forma que el número de eventos o el lapso de tiempo que puede contar es limitado. Cuando la capacidad del contador se excede, se produce una interrupción que le indica al microcontrolador lo que ha ocurrido. El programador decide si ignorar o no dicha interrupción.

2.4.4.5 Comparador analógico.

Algunos PIC disponen internamente de *Amplificadores Operacionales* que actúan como comparadores entre una señal fija de referencia y otra variable que se aplica por uno de los pines de la cápsula. La salida del comparador proporciona un nivel lógico 1 ó 0 según una señal sea mayor o menor que la otra. También posee un módulo de tensión de referencia que proporciona diversas tensiones de referencia que se pueden aplicar en los comparadores.

2.4.4.6 Interrupciones.

Una interrupción consiste en una detención del programa en curso para realizar una determinada rutina que atienda la causa, que ha provocado la interrupción, es como una llamada a subrutina. Tras la terminación de la rutina de interrupción, se retorna al programa principal en el punto en que se abandonó.

Las causas que originan una interrupción pueden ser externas, como la activación de un pin con el nivel lógico apropiado, e internas, como las que pueden producirse al desbordarse un temporizador, como el TMR0.

En aplicaciones industriales, las interrupciones son eventos muy potentes que sirven para atender acontecimientos físicos en tiempo real. Existen diferentes tipos de interrupciones que también dependen del tipo de microcontrolador que se está utilizando.

2.4.4.7 Perro guardián o “Watchdog”.

Cuando un computador personal se bloquea por un fallo del software u otra causa, es necesario pulsar el botón de reset para el sistema se reinicie inmediatamente. Pero un microcontrolador puede funcionar sin el control de un supervisor y de forma continua todo el tiempo en el que se lo esté utilizando. El *Perro guardián* consiste en un temporizador que, cuando se desborda y pasa por 0, provoca un reset automáticamente en el sistema.

Para realizar esta labor de supervisar, el *Perro guardián* revisa la CPU cada cierto tiempo y comprueba si el programa se ejecuta normalmente; en caso contrario, por ejemplo, si el control está detenido en un bucle infinito o a la espera de algún acontecimiento que no se produce, el *perro guardián* se desborda y provoca el reseteo del sistema.

Se debe diseñar el programa de trabajo que controla la tarea, de forma que cuando el microcontrolador esté trabajando correctamente no ocurra el reset automático, para ello se debe restaurar el timer del *perro guardián* por software.

2.4.4.8 Estado de reposo o de bajo consumo.

Son abundantes las situaciones reales de trabajo en que el microcontrolador debe esperar, sin hacer nada, hasta que se produzca algún acontecimiento externo que le ponga de nuevo en funcionamiento. Para ahorrar energía, (factor clave en los aparatos portátiles), los microcontroladores disponen de una instrucción especial (*SLEEP* en los PIC), que les pasa al estado de reposo o de bajo consumo, en el cual los requerimientos de potencia son mínimos. En dicho estado se detiene el reloj principal y se “congelan” sus circuitos asociados, quedando el microcontrolador sumido en un profundo “sueño”. Al activarse una interrupción ocasionada por el acontecimiento esperado, el microcontrolador se despierta y reanuda su trabajo.

2.4.4.9 Módulos de Comunicación.

Para dotar al microcontrolador de la posibilidad de comunicarse con otros dispositivos externos, otros buses de microprocesadores, buses de sistema, buses de redes y poder adaptarlos con otros elementos bajo otras normas y protocolos, algunos modelos disponen de recursos que se lo permiten.

El módulo MSSP (Master Synchronous Port) es un puerto de comunicación serial síncrona half y full duplex, orientado para comunicaciones con componentes externos.

Puede funcionar en dos modos de comunicación:

- SPI Serial Peripheral Interface
- I2C Inter-Integrated Circuit

Entre las herramientas que dispone el PIC18F452 se encuentra el puerto de comunicación USART, puede funcionar como un sistema de comunicación bidireccional, adaptándose a multitud de periféricos y dispositivos que transfieren información de forma serial, tales como un computador. También puede trabajar en modo unidireccional para soportar periféricos como memorias, conversores, etc.

Cada puerto serial puede ser configurado en forma distinta. Puede funcionar en los siguientes modos:

- Asíncrono - Full Duplex
- Síncrono Master - Half Duplex
- Síncrono Slave - Half Duplex

En el modo Asíncrono - Full Duplex. La comunicación es bidireccional. El pin RC6/TX actúa como línea de transmisión y la RC7/RX como línea de recepción. Cada dato lleva un bit de inicio y otro de stop.

En esta forma de comunicación serie, se usa la norma RS-232-C, donde cada palabra de información o dato se envía independientemente de los demás. Suele constatar de 8 o 9 bits y van precedidos por un bit de START (inicio) y detrás de ellos se coloca un bit de STOP (parada), de acuerdo con las normas del formato estándar NRZ (Non Return-to-Zero) Los bits se transfieren a una frecuencia fija y normalizada. La USART transmite y recibe primero el bit menos significativo.

En el modo Síncrono. La comunicación es unidireccional. Una sola línea para los datos que se implementan sobre el pin RC7/RX. En el modo master la señal de reloj sale por el pin RC6/TX. En el modo esclavo entra por este.

El módulo USART en modo asíncrono se debe considerar los siguientes elementos:

- Generador de Baudios
- Transmisor Asíncrono
- Receptor Asíncrono

Para el protocolo asíncrono RS-232-C, la frecuencia en baudios (bits por segundo) a la que se realiza la transferencia se debe efectuar a un valor normalizado: 330, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, etc. Para generar esta frecuencia, el USART dispone de un generador de frecuencia en Baudios, BRG, cuyo valor es controlado por el contenido grabado en el registro SPBRG.

El dato que se desea transmitir por el USART se deposita en el registro TXREG y a continuación se traspasa al registro de desplazamiento TSR, que envía los bits secuencialmente y a la frecuencia establecida. Además, antes de los bits del dato de información incluye un bit de inicio y después de sacar todos los bits añade un bit de parada, la figura 2-26 indica el diagrama de bloques del Transmisor del módulo USART.

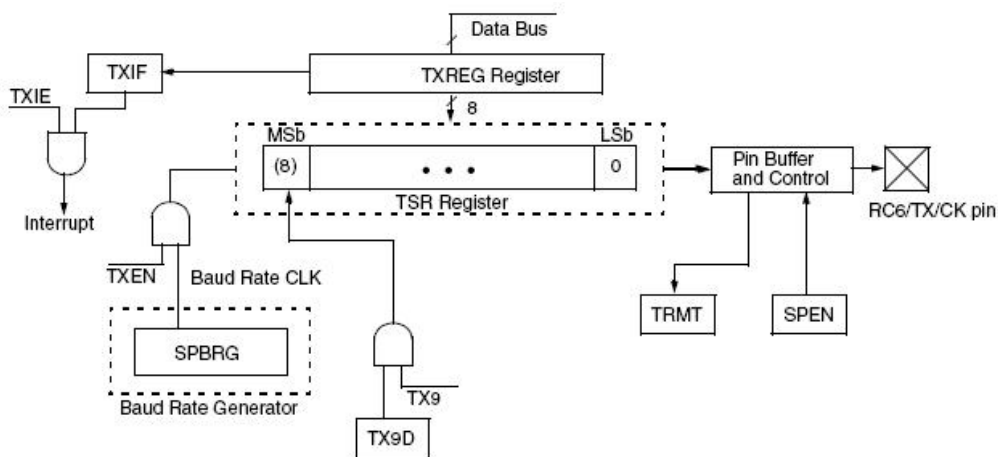


Figura 2—26 Diagrama de bloques del Transmisor USART.

El USART receptor recibe, uno a uno, los bits por el pin RC7/RX/DT, y los va guardando en el registro de desplazamiento RSR, luego los traslada

automáticamente al registro RCREG, donde quedan disponibles para su posterior procesamiento, la figura 2-27 muestra el diagrama de bloques del receptor USART.

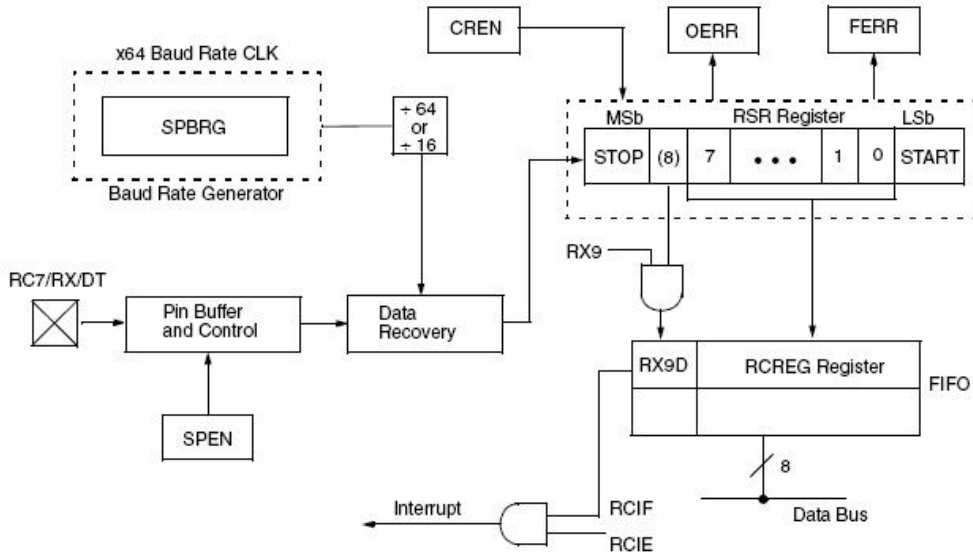


Figura 2—27 Diagrama de bloques del Receptor USART.

En la figura 2-28 se muestra la configuración de conexión para realizar la comunicación serial entre el PIC 18F452 y el puerto del PC.

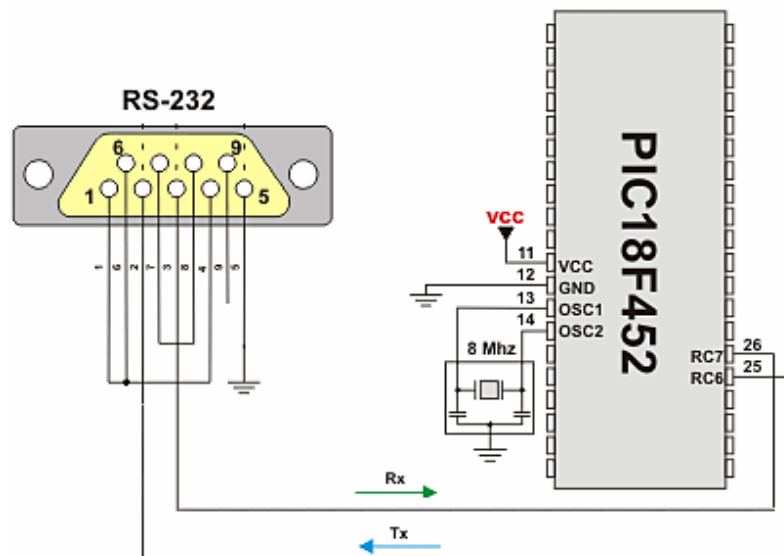


Figura 2—28 Esquema de conexión para comunicación serial.

El esquema de conexión mostrado, puede ser usado únicamente para distancias cortas de comunicación; para asegurar el correcto funcionamiento del módulo de comunicación se suele emplear una interface para adaptar los niveles lógicos de voltaje.

2.5 Puerto Serial.

El puerto serial es una interfaz de comunicaciones entre computadores y periféricos como PLC's, programadores de microcontroladores, dispositivos electrónicos especiales, en donde la información es transmitida bit a bit enviando un solo bit a la vez.

2.5.1 El protocolo RS232.

El protocolo RS-232 es una norma o estándar mundial que determina los parámetros de uno de los modos de comunicación serial. Por medio de este protocolo se estandarizan las velocidades de transferencia de datos, la forma de control que utiliza dicha transferencia, los niveles de voltajes utilizados, el tipo de cable permitido, las distancias entre equipos, los conectores, etc. La última versión disponible es la definida por la EIA (Electronic Industries Association) como *RS-232C* siendo ésta la tercera revisión de la antigua norma RS-232.

El RS-232C consiste en un conector tipo DB-25 de 25 pines, aunque el más utilizado es el de 9 pines denominada DB-9; en la figura 2-29 se muestra la disposición de pines del conector DB-9.

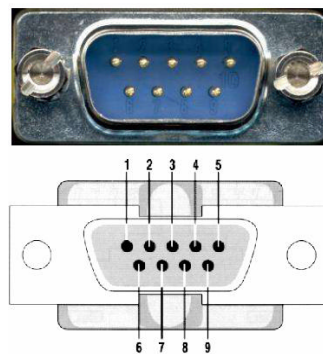


Figura 2—29 Disposición de pines del conector DB-9 macho.

La tabla 2-7 muestra; el número, la función y la descripción de cada pin del conector DB-9.

Pin	Señal	Descripción
1	DCD (Data Carrier Detect)	Determina si el <i>módem</i> ²⁶ está conectado a una línea telefónica en funcionamiento.
2	RXD (Receive Data)	El computador recibe la información enviada al módem.
3	TXD (Transmit Data)	El computador envía información al módem.
4	DTR (Data Terminal Ready)	El computador le indica al módem que está listo para hablar.
5	SG (Signal Ground)	Pin de conexión a tierra.
6	DSR (Data Set Ready)	El módem le indica al computador que está listo para hablar.
7	RTS (Request To Send)	El computador le pregunta al módem si esta puede enviar información.
8	CTS (Clear To Send)	El módem le indica al computador que ya le puede enviar información.
9	RI (Ring Indicador)	Una vez que una llamada ha tomado lugar, el computadora reconoce por esta señal (enviada por el módem) que una llamada es detectada.

Tabla 2—7 Descripción de pines conector DB-9.

El RS-232 puede transmitir los datos en grupos de 5, 6, 7 u 8 bits, a velocidades determinadas (normalmente, 9600 bits por segundo o más). Después de la transmisión de los datos, le sigue un bit opcional de paridad (indica si el número de bits transmitidos es par o impar, para detectar fallos), y después 1 o 2 bits de Stop; normalmente, el protocolo utilizado es 8N1 (que significa, 8 bits de datos, sin paridad y con 1 bit de Stop).

Los dos equipos que pretenden ser conectados, es decir computador y periférico, tienen que usar el mismo protocolo serie para comunicarse entre si. Puesto que el

²⁶ **Módem:** Del término inglés *modem*, es un acrónimo de modulador y demodulador. Se trata de un dispositivo, externo o interno (tarjeta módem), utilizado para la comunicación de computadoras a través de líneas analógicas de transmisión y recepción de voz y/o datos.

estándar RS-232 no permite indicar en que modo se esta trabajando, es el usuario quien tiene que decidirlo y configurar ambas partes. Como ya se ha visto, los parámetros que hay que configurar son: protocolo serie (8N1), velocidad del puerto serie, y protocolo de control de flujo. Este último puede ser por hardware o por software. La velocidad del puerto serie no tiene que ser la misma que la de transmisión de los datos, de hecho debe ser superior. Por ejemplo, para transmisiones de 1200 baudios es recomendable usar 9600, y para 9600 baudios se pueden usar 38400 (o 19200).

2.5.2 Tipos de comunicación serial.

Existen dos formas de comunicación serial: la sincrónica y la asincrónica. En la comunicación sincrónica, se utilizan dos líneas; además de una línea sobre la que se transfieren los datos, se necesita otra que contenga los pulsos de reloj que indiquen cuando un dato es válido; la duración del bit está determinada por la duración del pulso de sincronismo, como ejemplo de este tipo de comunicación se tiene los protocolos:

- I2C (Inter Integrated Circuit)
- SPI (Serial Peripheral Interface)

En la comunicación asíncrona, los pulsos de reloj no son necesarios y se acude a otros medios para realizar la lectura y escritura de datos. La duración de cada bit esta determinada por la velocidad de referencia con la cual se esta realizando la transferencia de datos.

La figura 2-30 indica la estructura de un caracter enviado con comunicación asincrónica. Cuando no se realiza ninguna transferencia de información, la línea del transmisor es pasiva (*idle*) y permanece en estado alto. Para iniciar la transferencia de datos, el transmisor coloca esta línea en bajo durante el tiempo de un bit, lo cual se conoce como bit de inicio (*start bit*) y a continuación, empieza a transmitir con el mismo intervalo de tiempo , los bits correspondientes al dato (suelen consistir en 7 u 8 bits), empezando con el menos significativo (LSB), y terminando con el bit más significativo (MSB); al finalizar, se agrega un bit de

paridad (*parity bit*), si está activada esta opción, y los bits de parada (*stop bit*), que pueden ser 1 ó 2 bits, en los cuales la línea regresa a un estado alto. Al concluir este proceso el transmisor está preparado para transmitir el siguiente dato.

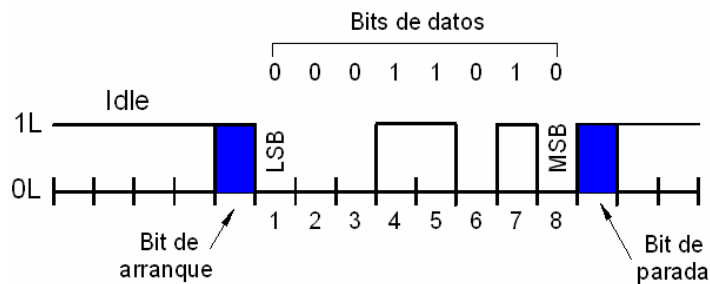


Figura 2—30 Estructura de la transmisión asincrónica de un carácter.

El receptor no está sincronizado con el receptor, y por lo tanto no sabe cuando va a recibir datos. Por lo tanto el transmisor y el receptor deberán tener los mismos parámetros de velocidad, paridad, número de bits del dato transmitido y de bit de parada.

El cambio de estado de alto a bajo de la línea del transmisor activa al receptor y éste realiza un conteo de tiempo de tal manera que realiza una lectura de línea, medio bit después del evento; si la lectura realizada es un estado alto, asume que el cambio de estado fue producto de ruido electrónico en la línea; si por el contrario, la lectura es un estado bajo, considera como válido el cambio de estado y empieza a realizar lecturas secuenciales a intervalos de un bit, hasta conformar el dato transmitido. El transmisor puede tomar el bit de paridad para determinar la existencia o no de errores y realizar las acciones correspondientes.

En circuitos digitales, cuyas distancias son relativamente cortas, se puede manejar transmisiones en niveles lógicos TTL (0-5V), pero cuando las distancias aumentan, estas señales tienden a distorsionarse debido al *efecto capacitivo de los conductores*²⁷ y su resistencia eléctrica. El efecto se incrementa a medida que

²⁷ **Efecto capacitivo de los conductores:** Las largas líneas de conducción presentan inductancia, capacitancia y resistencia al paso de la corriente eléctrica. El efecto de la inductancia y de la capacitancia de la línea es la variación de la tensión si varía la corriente.

se incrementa la velocidad de la transmisión. Todo esto origina que los datos recibidos no sean igual a los datos transmitidos, por lo que no se puede permitir la transferencia de datos.

Una de las soluciones más lógicas, es aumentar los márgenes de voltaje con que se transmiten los datos, de tal manera que las perturbaciones por causa de la línea se puedan corregir.

2.5.3 Niveles de voltaje.

La norma RS-232 indica que el puerto serial manipula niveles de voltaje positivos y negativos con el fin de lograr una mayor distancia de conexión entre equipos, internamente existe un circuito que convierte los voltajes digitales TTL en voltajes más elevados, en la figura 2-31 se muestra los voltajes y su representación lógica.

Un "1" lógico es un voltaje comprendido entre $-5V$ y $-15V$ en el transmisor y entre $-3V$ y $-25V$ en el receptor.

Un "0" lógico es un voltaje comprendido entre $+5V$ y $+15V$ en el transmisor y entre $+3V$ y $+25V$ en el receptor.

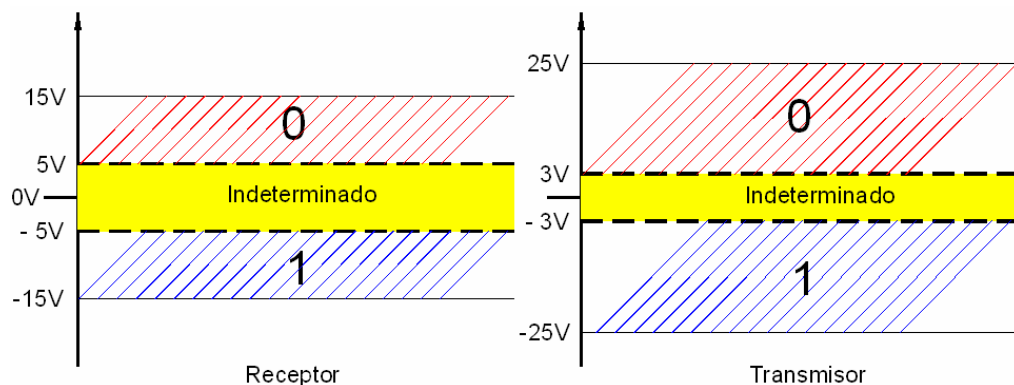


Figura 2—31 Niveles de voltaje utilizados en el puerto serial.

El envío de niveles lógicos (bits) a través de cables o líneas de transmisión necesita la conversión a voltajes apropiados. En los microcontroladores para representar un '0 lógico' se trabaja con voltajes inferiores a 0.8V y para un '1

lógico' con voltajes mayores a 2V. En general cuando se trabaja con familias TTL y CMOS se asume que un "0" lógico es igual a cero Volts y un "1" lógico es igual a 5 Volts.

La importancia de conocer esta norma, radica en los niveles de voltaje que maneja el puerto serial del computador, ya que son diferentes a los que utilizan los microcontroladores y los demás circuitos integrados. Por lo tanto se necesita de una interface que haga posible la conversión de niveles de voltaje a los estándares manejados por los circuitos integrados TTL.

2.5.4 El circuito integrado MAX-232.

Este circuito soluciona los problemas de niveles de voltaje, cuando se requiere enviar unas señales digitales sobre una línea RS-232. Este chip se utiliza en aquellas aplicaciones donde no se dispone de fuentes dobles de +12V y -12V. El MAX 232 necesita solamente una fuente de +5V para su operación, internamente tiene un elevador de voltaje que convierte el voltaje de +5V al de doble polaridad de +12V y -12V.

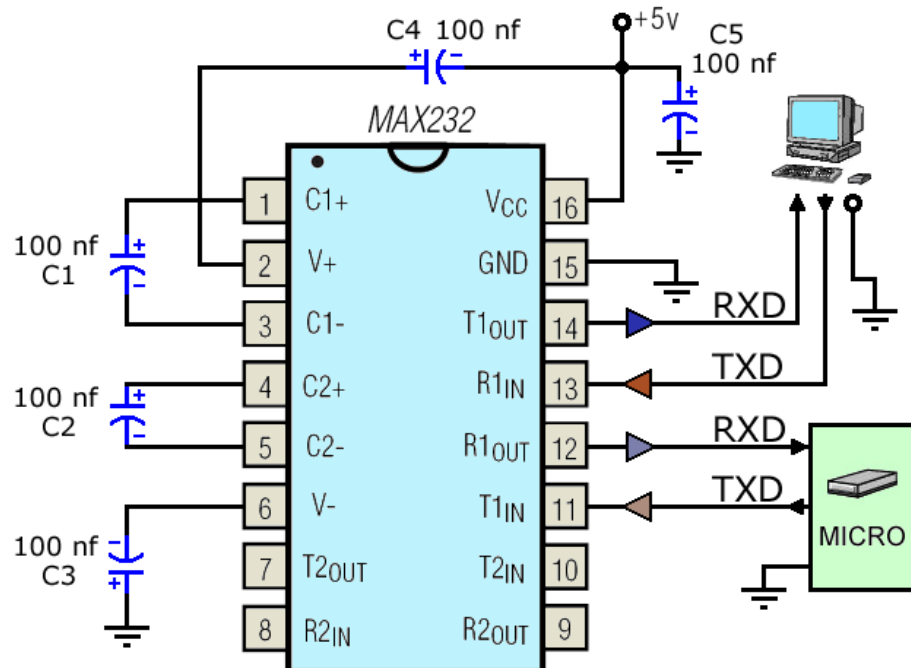


Figura 2—32 Uso del MAX-232 para comunicar un microcontrolador y el PC.

Cabe mencionar que existen una gran variedad de CI's que cumplen con la norma RS-232 como lo son: MAX220, DS14C232, MAX233, LT1180A. Sin embargo por el precio y su facilidad de obtención, el MAX 232 de la marca MAXIN es el más utilizado para estas aplicaciones. La figura 2-32 muestra la disposición de conexión del MAX-232 para adaptar la señal TTL del microcontrolador al nivel RS-232 del computador.

2.5.5 Pasos para establecer una comunicación serial.

Siempre que se va establecer comunicación a través de un puerto serial, es necesario definir algunos parámetros de tal forma que coincidan en los dos equipos que establecen la comunicación. Estos parámetros son: la velocidad, la paridad, los bits de inicio/parada, y el control de flujo.

2.5.5.1 Velocidad.

Las velocidades para transmisión de datos más comunes son 300, 600, 1200, 2400, 9600, 14400, 28800 bits por segundo o *baudios*, si se usa una comunicación asincrónica la duración del bit depende de la velocidad empleada; por ejemplo transmitiendo a 1200 baudios, la duración de cada bit es de 833 microsegundos, esto es porque el período es inverso a la frecuencia.

Es posible tener velocidades más altas, pero se reduciría la distancia máxima posible entre los dispositivos. Las altas velocidades se utilizan cuando los dispositivos se encuentran uno junto al otro.

2.5.5.2 Paridad.

Es un bit que indica si la suma de los bits de datos es par o impar. Se utiliza como mensaje para verificar si la información recibida es la correcta.

La paridad puede configurarse de diversas formas:

- No Parity (sin paridad), no se transmite bit de paridad

- Even Parity (paridad “par”).
- Odd Parity (paridad “impar”).
- Mark Parity (paridad de “marca”), el bit de paridad siempre es uno
- Space Parity (paridad de “espacio”), el bit de paridad siempre es cero

2.5.5.3 Control de flujo.

En RS-232 el control de flujo se puede hacer de dos maneras: por hardware (RTS/CTS) o por software (Xon/Xoff).

- Por Software, el carácter Xoff (ASCII 19, CTRL-S) es utilizado por el receptor para decir que su buffer está lleno y el emisor debe esperar. Cuando vuelva a tener espacio en el buffer, enviará el carácter Xon (ASCII 17, CTRL-Q), diciéndole que puede volver a transmitir. Esto economiza cables en la interconexión, pero ocupa espacio en el canal.
- Para realizar el control de flujo por hardware, se requiere que entre el computador y el módem se conecten dos hilos: RTS y CTS. Cuando se desactiva RTS el computador le pregunta al módem si éste puede enviar información. Cuando el buffer del receptor se llena el módem le indica al computador que espere, desactivando la señal CTS. Cuando vuelva a tener espacio en el buffer, activa nuevamente el CTS para decir que está nuevamente listo.

2.6 Acceso al puerto serial a través de LabView.

LabView es un sistema de programación de propósito general, pero también incluye librerías de funciones y herramientas de desarrollo diseñadas específicamente para adquisición de datos y control de instrumentos.

Con LabView es posible comunicarse con los puertos de comunicación que posee el computador, tanto como el puerto paralelo, el puerto serial y el puerto USB, siendo ésta una de las grandes ventajas ya que con un microcontrolador PIC se puede aceptar un dato enviado desde el computador.

2.6.1 VISA para el control de instrumentos

VISA es un estándar para configuración, programación y dar solución a problemas en sistemas de instrumentación compuestos por interfaces GPIB, PXI, Serial, Ethernet y USB. VISA proporciona la interfaz de programación entre el hardware y los ambientes de desarrollo tales como LabVIEW, LabWindows/CVI y Measurement Studio para Microsoft Visual Studio .NET.

2.6.2 Comunicación por puerto RS-232 y LabView.

Usando la base abstracta de VISA con USBTMC, la comunicación de instrumentos USB es muy similar a la comunicación estándar de instrumentos GPIB. Cuando se usa USBTMC, la diferencia principal entre la comunicación GPIB y la conectividad USB radica en la implementación de la cadena de recursos.

Para implementar la comunicación con el puerto serial se requiere que el dispositivo a comunicar se encuentre conectado correctamente en el puerto del computador. Una vez que ha terminado la implementación de la cadena de recursos, solo necesita cuatro pasos para completar la comunicación serial basada en VISA:

1. **Vi Open.** Verifica la conexión con el instrumento y abre la sesión para este.
2. **Vi Write.** Envía comandos al dispositivo.
3. **Vi Read.** Lee respuestas desde el comando ViWrite (los pasos 2 y 3 pueden iterar varias veces hasta que la comunicación se complete).
4. **Vi Close.** Libera la sesión del instrumento y cierra la sesión VISA.

La figura 2-33 indica gráficamente los cuatro pasos para realizar la comunicación con un dispositivo RS-232 usando el paquete NI-VISA.

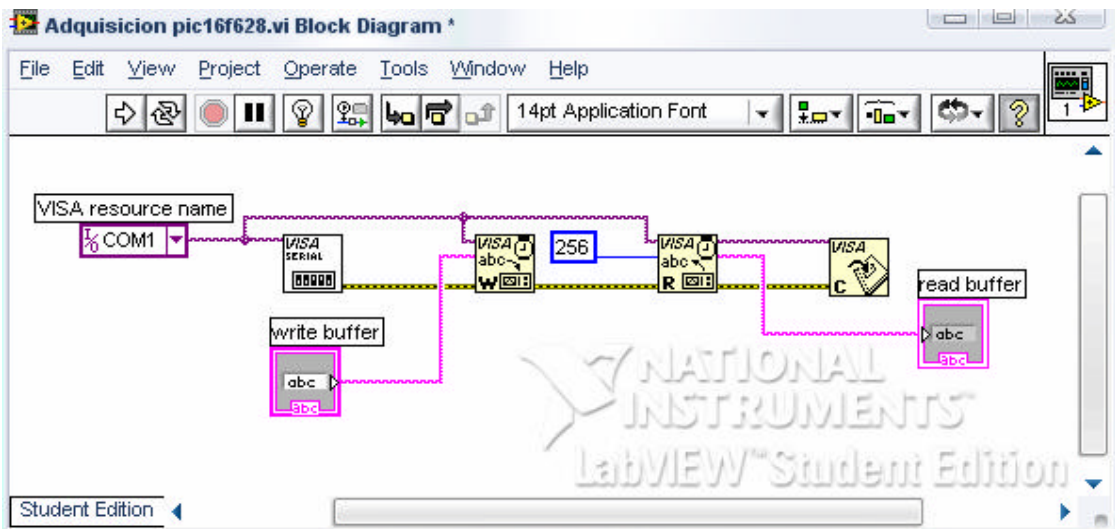


Figura 2—33 Comunicación de un dispositivo RS-232 con NI-VISA.

El *Vi Open* posee varias derivaciones, la misma que se muestran en la figura 2-34, estos son los parámetros que se deben configurar para establecer la comunicación serial y que se describen detalladamente en la sección 2.5 Las derivaciones más importantes del *Vi Open* son:

- *VISA resource name*: Selecciona el puerto del cual se van a leer los datos procedentes del PIC. El puerto serial es el COM1 o COM2 dependiendo del computador y se debe verificar para seleccionarlo acertadamente en esta opción. Si se quisiera usar transmisión en paralelo se podría escoger otro puerto, como por ejemplo el LPT.
- *Baude rate*: Selecciona la velocidad de lectura de los datos. Este valor tiene que ser igual que el valor de transmisión de los bits desde el PIC. En caso que sean diferentes la señal obtenida será errónea.
- *Data bits*: Este botón sirve para seleccionar el número de bits que se van a leer desde el buffer procedentes del PIC. Si desde el PIC se transmite 8 bits este valor tiene que valer 8, es decir, este valor tiene que ser igual que el del PIC.

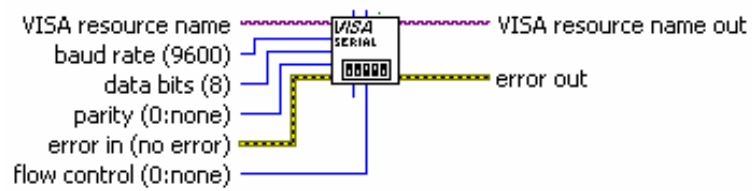


Figura 2—34 Configuración del puerto serial con VISA.

Los datos procedentes del puerto serie son caracteres ASCII, por lo tanto se los debe digitalizar y convertirlos a cualquier sistema de numeración más adecuado para la aplicación.

CAPITULO III

3 DISEÑO ELECTRÓNICO.

3.1 Introducción.

Para desarrollar el presente proyecto, se pretende diseñar y construir un módulo físico que realice la sincronización manual y automática de un generador sincrónico con la red eléctrica.

Posterior a la sincronización se proyecta realizar el control de potencia activa P y reactiva Q desde un PC por medio del software LabView; para lo cual el módulo de sincronización automático a implementar se comunicará con el PC mediante protocolo RS-232.

Se debe entonces, diseñar el módulo con características técnicas para que se adapte al Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

El proyecto general consta de dos partes:

- *Hardware*. Compuesto por un módulo físico, el mismo que estará conformado por elementos electromecánicos y tarjetas electrónicas, que en conjunto conforman el *hardware*; el mismo que será desarrollado en el presente capítulo.
- *Software*. El software constituye toda la parte de programación del microcontrolador y el desarrollo del programa para el control de potencia, este tema se desarrolla en el capítulo 4.

3.2 Determinación de la mecánica del proceso.

Puntualmente, la finalidad del Módulo de Sincronización Automática es el de cerrar un interruptor o contactor, el mismo que conectará el generador trifásico sincrónico de rotor liso (modelo Barth 004.021) en paralelo con la red eléctrica trifásica de 220 V y 60 Hz, disponibles en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas. En la figura 3-1 se presenta el diagrama de bloques del sistema de sincronización automática.

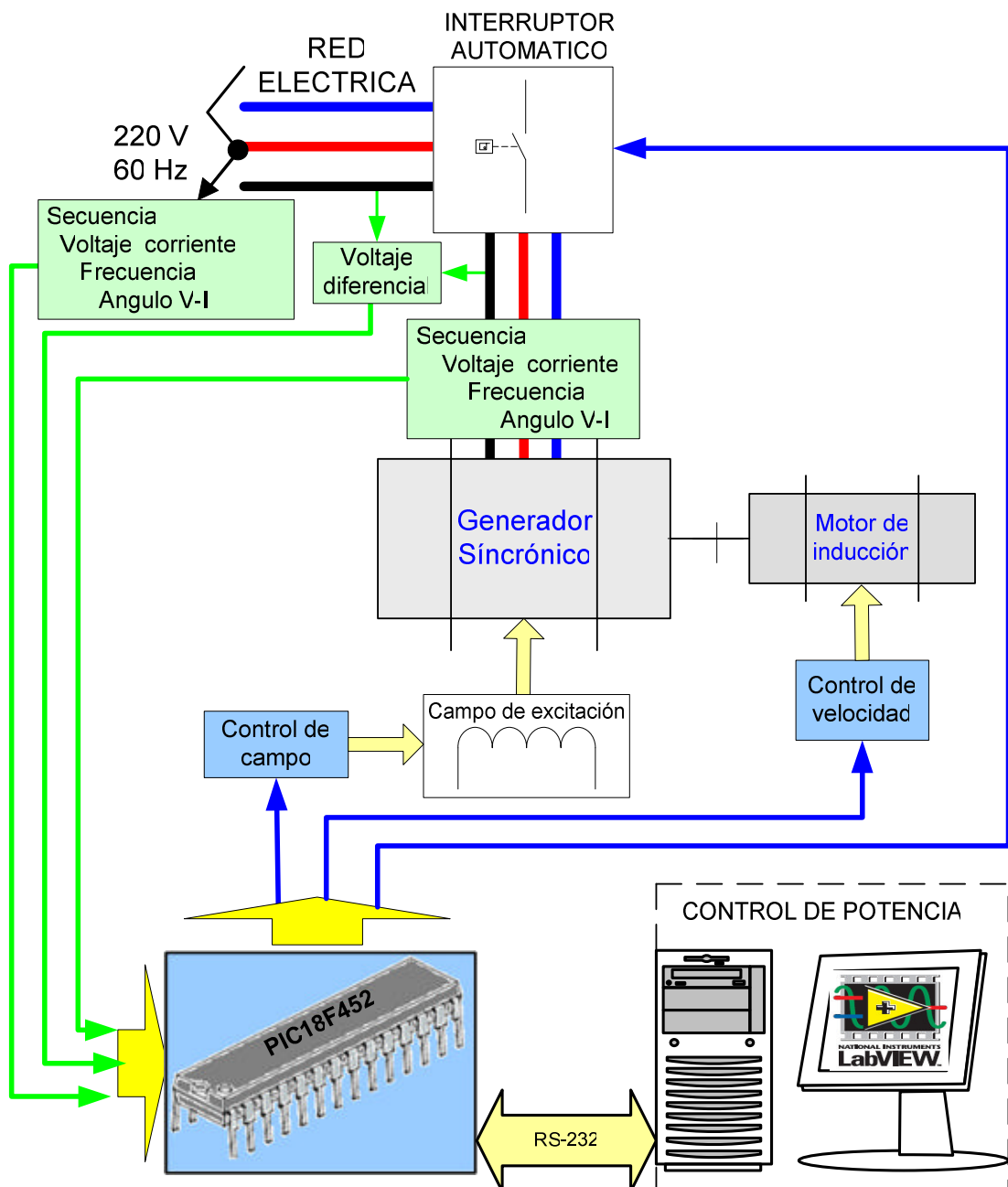


Figura 3—1 Diagrama de bloques del sistema.

En la figura anterior, el microcontrolador PIC18F452 es el encargado de decidir el instante más apropiado en el que el interruptor automático cierre sus contactos. Para este propósito, se debe sensar la secuencia de fases, el voltaje entre líneas, y la frecuencia de la red eléctrica; estos datos serán analizados por el microcontrolador y en base a ellos, empezará a controlar el voltaje generado y la frecuencia del generador sincrónico.

Para variar la velocidad del generador, se acoplará al eje del mismo un motor de inducción con *rotor jaula de ardilla* (modelo Barth 004.003), este motor será gobernado por un variador de frecuencia (ACS300).

Una vez que los parámetros del generador se igualen a los de la red eléctrica, el microcontrolador debe verificar el desfase entre el voltaje de la *fase A* de la red eléctrica y la *fase A* del generador sincrónico. Cuando esta diferencia de voltajes sea igual a cero el microcontrolador mandará a cerrar el interruptor automático (contactor); posterior a la conexión en paralelo, se realizará el monitoreo y control de potencia desde un PC mediante una aplicación diseñada en LabView, con comunicación RS-232 entre el módulo y el PC. Para medir la potencia se empleará el *Método de Arón*²⁸; es necesario entonces, sensar también las corrientes de fase del generador y el respectivo ángulo de desfase entre voltaje y corriente.

3.2.1 Requerimientos del sistema.

Al efectuar el respectivo análisis del proceso, se determinó que debe cumplir con las siguientes exigencias:

1. El sistema debe instalarse en un módulo compacto con dimensiones tales que se pueda montar en las estanterías del Laboratorio de Máquinas eléctricas.

²⁸ **Método de Aarón:** Se emplea para medir *Potencia* alterna trifásica sin neutro. En un sistema trifásico, sin neutro, la suma algebraica de corrientes es igual a cero; por lo tanto la potencia total puede expresarse en función de dos potencias parciales. Entonces, si se disponen de dos vatímetros con sus bobinas amperimétricas conectadas en dos fases cualesquiera y sus bobinas voltimétricas entre las dos fases anteriores y la tercera, la suma de las lecturas corresponderá a la potencia activa total. De ahí que también se le conoce como el *Método de los dos Vatímetros*.

2. El módulo estará conformado internamente por tarjetas de circuito impreso que contendrán toda la circuitería necesaria para el control del sistema, un display LCD que indique el estado y las variables del proceso, un teclado que permita acceder a los parámetros de configuración, y un puerto para comunicación RS-232.
3. El módulo dispondrá, de un voltímetro diferencial analógico de led's que permitirá visualizar el momento en el que el voltaje entre fases es cero.
4. En el módulo se incluirá terminales para ingresar los 220V trifásicos de la red eléctrica, y entradas para las fases del generador.
5. Tendrá una salida análoga de 0 a 10V para controlar un variador de frecuencia y una salida PWM para el control de campo del generador.
6. El módulo realizará completamente el proceso de sincronización del generador y la red eléctrica, una vez completada esta operación, se podrá realizar el control de energía manualmente (Potencia Activa y Reactiva) mediante el PC.
7. Para el monitoreo de las variables y el control de energía se empleará el software LabView.

3.2.2 Identificación de las variables.

Para determinar las variables del proceso que deben ser monitoreadas se analizó el *Procedimiento para la sincronización de Generadores* descrito en la sección 1.5.2. Una vez identificadas las variables se las asignará un nombre con el cual se las identificará en el diseño del software y hardware.

3.2.2.1 Variables de entrada.

De la Red eléctrica es necesario medir el voltaje entre dos líneas L1 y L2; ya que la *Red es balanceada*²⁹ se tendrá el mismo nivel de voltaje entre sus tres líneas, éste será el voltaje de referencia al que deberá llegar el generador entrante. También debe ser determinada la frecuencia y la secuencia de fases. Estas 3

²⁹ **Red balanceada:** Los voltajes trifásicos están balanceados cuando la amplitud, frecuencia y desfase es idéntica entre las tres, para ello la carga debe estar balanceada en cada línea, además los generadores están conectados en estrella, con el punto neutro común conectado a tierra.

variables serán medidas para lograr que el *módulo de sincronización* realice todas sus actividades automáticamente sin necesidad de ingresar los datos en forma manual.

Del generador sincrónico se medirán la secuencia de fases, dos voltajes entre líneas; es decir, entre A-B y C-B, también las corrientes que circulan por las líneas A y C, esto con la finalidad de tener referencia del voltaje generado y además para determinar la potencia entregada al conectar una carga. También es necesario medir la frecuencia para determinar la velocidad con la que gira y poder controlarla. Para determinar la potencia, a más de las corrientes y voltajes, es necesario medir el ángulo de desfase entre ellos. En la tabla 3-1 se indica el nombre asignado a cada variable de entrada.

Sistema	Variable	Nombre asignado
Red Eléctrica	Voltaje entre fases L1-L2	Vred
	Frecuencia en L1 y el punto neutro	Fred
	Secuencia de fases	Secred
Red/Generador	Voltaje diferencial entre fases L1 - A(R)	Vdif
Generador	Voltaje entre fases A-B	Vgab
	Voltaje entre fases C-B	Vgcb
	Corriente de fase A	Ia
	Corriente de fase C	Ic
	Angulo entre I_A y V_{AB}	Delta1
	Ángulo entre I_C y V_{CB}	Delta2
	Frecuencia en T y el punto neutro	Fgen
	Secuencia de fases	Secgen

Tabla 3—1 Variables de entrada.

Se debe medir además el voltaje diferencial entre la fase L1 de la Red y la fase A del generador, este voltaje es muy importante ya que puede ser elevado e indica el desfase entre las ondas de voltaje L1 de la red y A del generador; este voltaje

debe ser lo más cercano a cero para que entren en sincronismo el generador y la red.

3.2.2.2 Variables de salida.

Las variables de salida, son las encargadas de controlar, los parámetros del generador.

Se regulará la velocidad del motor de inducción (Barth 004.003) acoplado al eje del generador por medio de un variador de frecuencia, al mismo que se le enviará un voltaje DC analógico de 0 a 10V. El campo de excitación del generador se controla variando la corriente de excitación por medio del control PWM, generado por hardware desde el microcontrolador. En la tabla 3-2 se resume el nombre de las variables de salida.

Elemento a controlar	Variable	Nombre asignado
Variador de frecuencia	Voltaje 0 – 10 VDC	Fduty
	Contacto seco 24V para arrancar el variador	Onvar
	Contacto seco 24V para cambiar el sentido de giro del motor.	Invgir
Bobina de campo del generador	Voltaje 0 – 110 VDC	Vduty
Contactador trifásico	Pulso on/off para activar el Interruptor Automático.	Onrele

Tabla 3—2 Variables de salida.

Cuando el voltímetro diferencial se acerque a cero es el momento en el que se debe comandar el contactor, éste estará accionado por un relé que será activado por medio de voltaje digital on/off enviado por el microcontrolador.

3.3 Medición de variables y acondicionamiento de señales.

Todas las variables que son necesarias medir dentro del desarrollo de este proyecto son de tipo eléctricas; se debe elegir entonces los sensores apropiados y el acondicionamiento de señal respectivo.

Para medir las variables analógicas previamente se las debe acondicionar; para trabajar con señales de voltaje que varían en el tiempo, tomando cualquier valor intermedio desde un mínimo hasta un máximo voltaje de referencia, que para este proyecto se ha seleccionado de 0 a 5V; en la figura 3-2 se muestra un ejemplo de este tipo de señal.

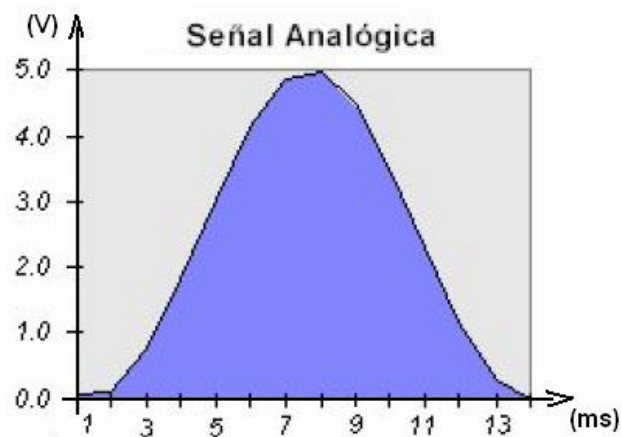


Figura 3—2 Señal de voltaje analógico.

En las señales digitales los voltajes tienen solo dos valores Alto (H) y Bajo (L), en realidad son dos franjas de valores de voltaje que dependen de los elementos usados en el circuito, no existe error mientras la señal permanezca dentro de la franja asignada para cada nivel. Se producen cambios de una franja a la otra, llamados flancos, éstos se producen en tiempos muy cortos que se pueden considerar en principio intervalos de tiempo cero.

En una señal digital se tiene cuatro elementos principales: nivel alto, nivel bajo, flanco positivo o de subida y flanco negativo o de bajada. En la figura 3-3 se indica estos niveles de voltaje.

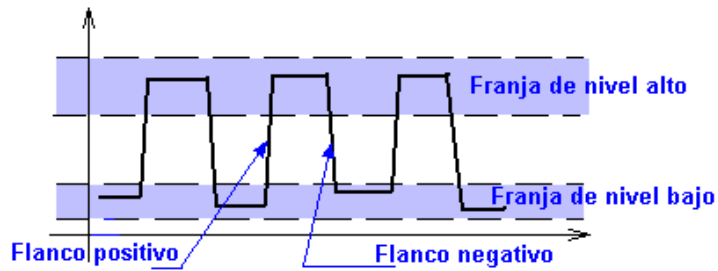


Figura 3—3 Niveles de voltaje digital.

Un transistor puede funcionar como un interruptor, si se hace pasar rápidamente de corte a saturación y viceversa. En corte es un interruptor abierto y en saturación es un interruptor cerrado. La figura 3-4 describe a un transistor bipolar tipo NPN trabajando entre corte y saturación, este puede ser usado como un circuito digital.

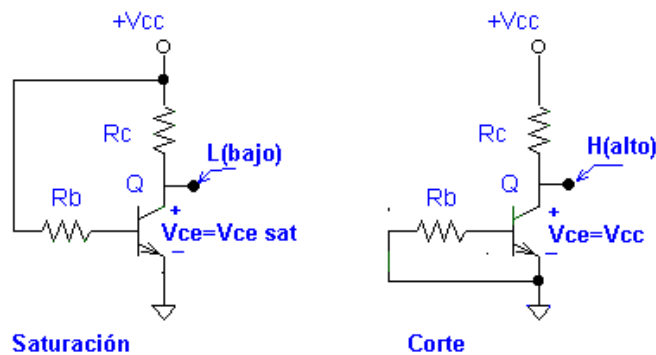


Figura 3—4 Configuración del transistor en corte y saturación.

Existen varias familias de Circuitos integrados, pero los más comunes son los TTL y CMOS, en la tabla 3-3 se muestra los niveles de voltaje al que trabajan.

Sigla	Familia	Voltaje fuente	Nivel alto	Nivel bajo
TTL	Lógica de transistor - transistor	5 VDC	2.5V a 5.5V	0.0V a 0.8V
CMOS	MOSFET complementario	15 VDC	0.0V a 4.0V	11.0V a 15.0V

Tabla 3—3 Familias de circuitos digitales.³⁰

³⁰ http://perso.wanadoo.es/luis_jujuy

Otra característica importante es la velocidad de transmisión de datos, los circuitos TTL son más rápidos que los C-MOS, por eso su mayor uso en sistemas de computación.

Para este proyecto se utilizará circuitos integrados de tecnología TTL, por lo tanto hay que diseñar todo el circuito de control para que utilice los 5V normalizados que emplea esta tecnología, en el Anexo A se adjunta las hojas de datos de todos los elementos electrónicos empleados en el desarrollo de este proyecto.

3.3.1 Medición de voltaje.

Para medir el voltaje se emplea el principio del voltímetro digital que consta de dos partes: una digital y otra analógica.³¹

La parte digital consiste en un convertor Análogo/Digital (esta conversión la efectuará el microcontrolador) y la pantalla de cristal líquido o LCD; la sección analógica está formada por divisores de tensión, el convertor de corriente alterna a continua y el convertor de voltaje eficaz o RMS.³²

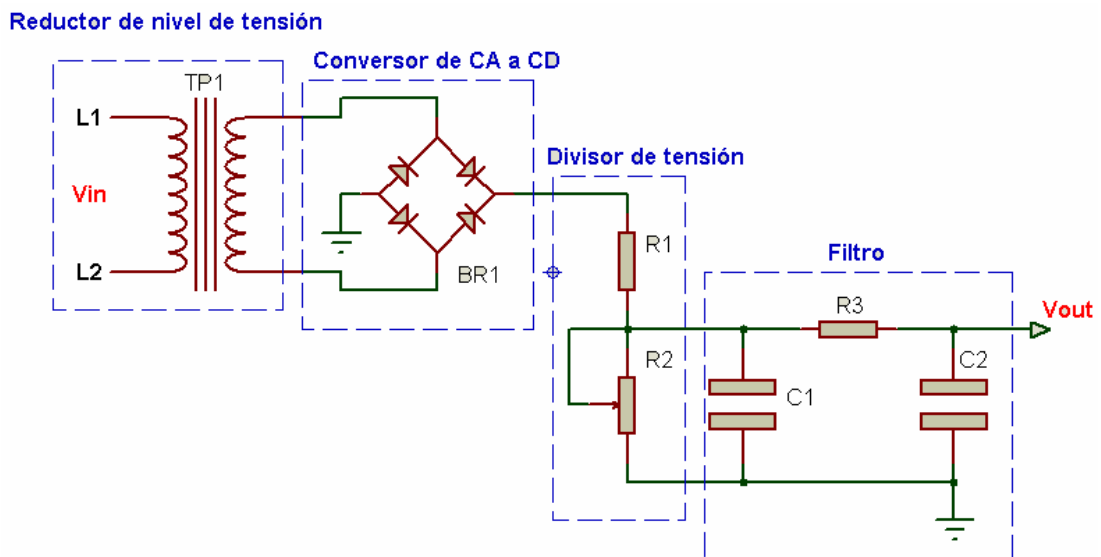


Figura 3—5 Circuito para sensar el voltaje.

³¹ <http://web.frm.utn.edu.ar/medidase2/varios/tester1.pdf>

³² **RMS:** Root Mean Square (Raíz Media cuadrática). El valor rms es el valor de voltaje o corriente que en C.A., produce el mismo efecto de disipación de calor que su equivalente de voltaje o corriente en C.D.

Tomando en cuenta estos principios; para sensar el voltaje se utilizará: un TP (transformador de potencial) para reducir el nivel de tensión, un conversor de corriente alterna a continua, un divisor de tensión formado por resistencias y un filtro para disminuir el *rizado*³³ (r) de la señal, como se muestra en la figura 3-5.

La Potencia relaciona el voltaje y la corriente según la ecuación 3.1.

$$P = VI \quad (3.1)$$

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.2)$$

Para calcular las resistencias del divisor se considera una potencia de disipación máxima de 0.1W, según la ecuación 3.1, se obtiene $I = 4.2\text{mA}$.

Según la *Ley de Ohm*³⁴ expresada en la ecuación 3.2, se obtiene $R1 = 5.7\text{K}\Omega$; tomando en cuenta los valores normalizados de resistencia se toma $R1 = 5.6\text{K}\Omega$.

Para obtener R2 se toma en cuenta que el voltaje de salida debe ser 5Vdc cuando a la entrada se aplique 24Vrms provenientes del secundario del transformador, estos voltajes se expresan en sus valores máximos que son: 7.853V en la salida y 33.9V en la entrada, según la expresión 3.3 y 3.4 respectivamente.

$$V = \frac{2M}{\pi} \quad (3.3)$$

$$M = \sqrt{2} m \quad (3.4)$$

³³ **Rizado:** Es la relación que permite saber cuanto de voltaje AC hay presente en el voltaje DC.

³⁴ Según Georg Ohm, físico alemán conocido sobre todo por su investigación de las corrientes eléctricas, la cantidad de corriente que fluye por un circuito formado por resistencias puras es directamente proporcional a la fuerza electromotriz aplicada al circuito, e inversamente proporcional a la resistencia total del circuito. Esta ley suele expresarse mediante la fórmula $I = V/R$, siendo I la intensidad de corriente en amperios, V la fuerza electromotriz en voltios y R la resistencia en ohmios.

$$V = \frac{R2}{R1 + R2} V \quad (3.5)$$

Aplicando la ecuación de divisores de tensión expresada en 3.5 se obtiene como resultado un valor de $R2 = 1.19K\Omega$; para setear este valor de resistencia, se emplea un potenciómetro de precisión.

La figura 3-6 indica la simulación y comprueba los valores hasta aquí calculados de voltaje y resistencia.

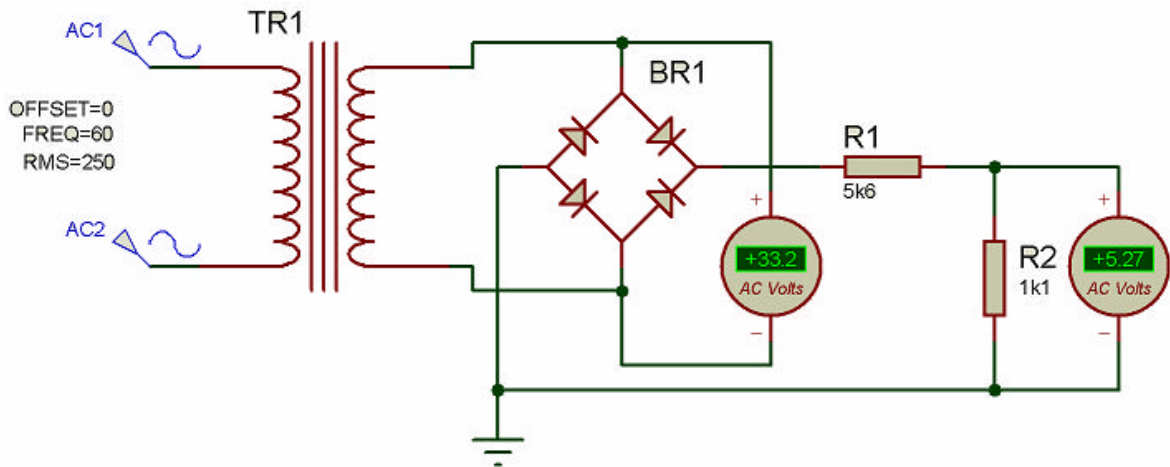


Figura 3—6 Simulación del divisor de voltaje.

La ecuación 3.6 determina el rizado presente en la señal DC.

$$r = \frac{1}{4\sqrt{3}R} \quad (3.6)$$

Para C1 se considera un valor de 22uF, aplicando la ecuación 3.6 se obtiene un rizado de 0.00789 ó 0.78% de corriente alterna presente en el voltaje de salida. Para disminuir más el porcentaje de rizado se emplea un filtro RC dando valores de C2 = 10uF y R3 = 10KΩ. En la figura 3-7 se muestra la simulación y el voltaje de salida resultante, este circuito se emplea para determinar los voltajes V_{red} y V_{gab} determinados en la tabla 3-1.

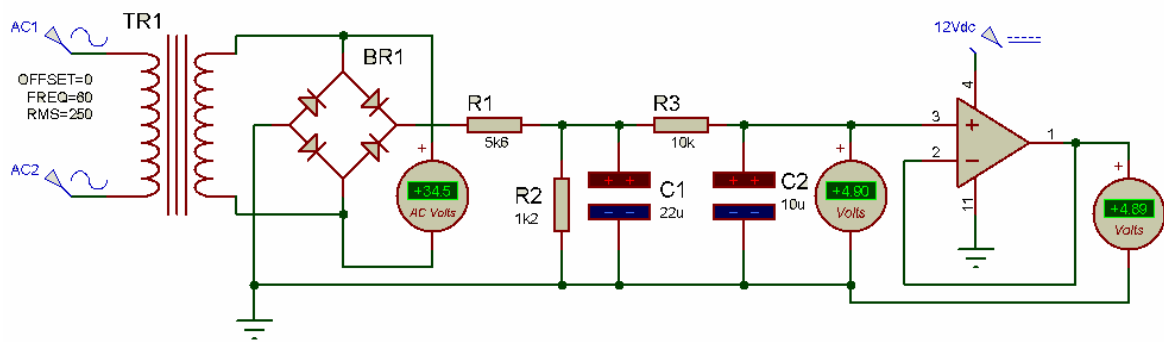


Figura 3—7 Simulación del circuito sensor de voltaje.

A la salida del condensador C2, se ha acoplado un amplificador operacional LM324 configurado como seguidor de tensión no inversor, con esta configuración se consigue que el voltaje de salida sea igual al de entrada y tiene su principal aplicación como *acoplador de impedancia*.³⁵

3.3.2 Medición de frecuencia.

La frecuencia de una señal periódica, es la medición de la cantidad de veces que se repite la forma de onda en un período de tiempo especificado. Típicamente la frecuencia se expresa en ciclos por segundo, a esta unidad se le conoce como Hertz.³⁶

Para realizar la medición de la frecuencia existen dos métodos:

- Se puede contar la cantidad de pulsos que ocurren en un tiempo determinado.
- Se puede medir directamente el tiempo que duran los estados alto y bajo de la señal.

³⁵ **Acople de impedancias:** Para que exista la máxima transferencia de potencia se requiere que la impedancia de la carga sea igual a la impedancia de la fuente, es necesario conectar una impedancia del mismo valor de la fuente en paralelo con el dispositivo de alta impedancia, esta función la efectúa el amplificador operacional.

³⁶ http://www.roso-control.com/Espanol/EDU/MICRO/70_Proyectos/26_Encoder.pdf

Para aplicar cualquiera de estos métodos se debe realizar el acondicionamiento de la señal analógica en valores adecuados de voltaje para el posterior análisis de la información.

Para la transformación de la onda, se convierte la señal senoidal de entrada, en una señal de pulsos cuadrada de igual frecuencia, con valores entre 0 y 5 Voltios.

La figura 3-8 muestra el circuito empleado para realizar el acondicionamiento de la señal.

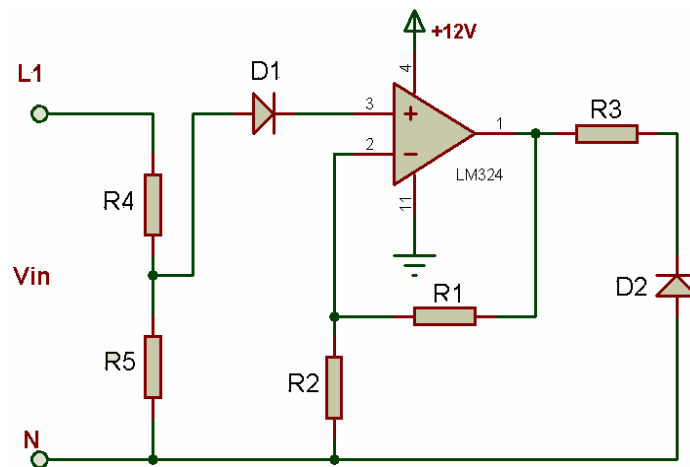


Figura 3—8 Acondicionamiento de señal para sensor frecuencia.

El diodo D1 corta los ciclos negativos de la señal de voltaje, ingresando los ciclos positivos al divisor de tensión, aplicando la ecuación 3.5 se obtiene los valores de $R4 = 240K\Omega$ y $R5 = 30K\Omega$; para una entrada de $115V_{rms}$, se obtiene un voltaje de referencia del divisor de $12V_{rms}$.

El voltaje de referencia se conecta a la entrada no inversora del amplificador operacional LM324. El voltaje a la salida del amplificador esta dado por la ecuación 3.7; el valor de la resistencia $R3 = 1K\Omega$, sirve para proteger al diodo D2 que es un zener que regula la salida a $5.1V$.

$$V = W \left(\frac{R1}{R2} + 1 \right) \quad (3.7)$$

La figura 3-9 indica la conversión de la onda senoidal en un pulso de 5 voltios por cada ciclo de onda.

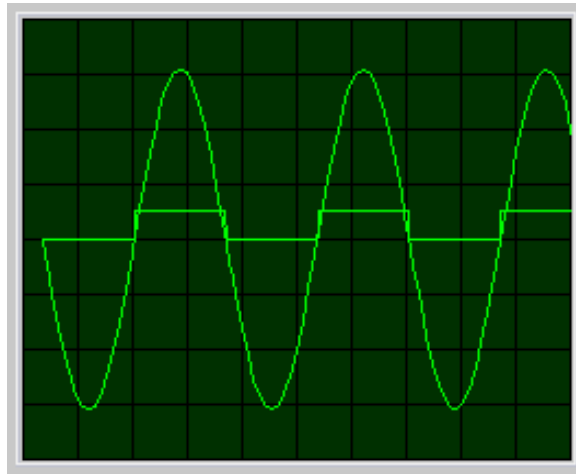


Figura 3—9 Conformación de la onda de voltaje.

Esta señal está acondicionada para ser ingresada al microcontrolador, éste se encargará de contar los pulsos durante una medida de tiempo para determinar la frecuencia de la señal; este circuito se emplea para determinar las variables *Fred* y *Fgen* que se describen en la tabla 3.1

3.3.3 Indicador de secuencia de fases.

Para determinar la secuencia de fases se ha decidido implementar un módulo independiente, éste será el encargado de analizar, determinar y enviar una señal digital indicando el tipo de secuencia en la que se halle conectado la *Red eléctrica* y el *generador sincrónico* por separado. Este circuito tiene la finalidad de reducir las actividades a realizar por el microcontrolador, y se refleja en mayor rapidez de operación por menos líneas de memoria ocupadas.

El diagrama de bloques de la figura 3-10 muestra el procedimiento para determinar la secuencia de fases, el mismo consta de un detector de red trifásica, que consiste en atenuar los voltajes trifásicos por medio de resistencias conectadas en un punto común a tierra del circuito.

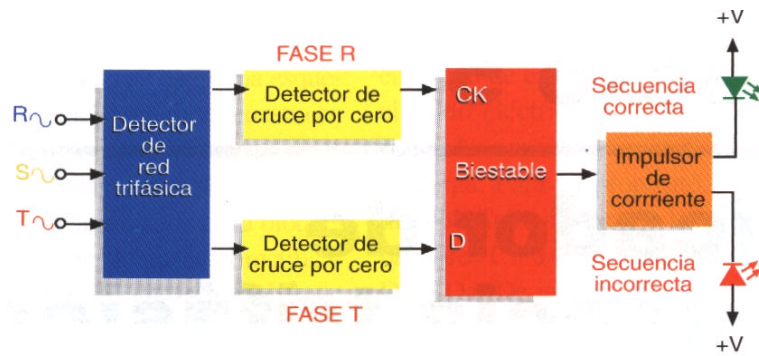


Figura 3—10 Diagrama de bloques del indicador de secuencia trifásica.

Una vez atenuada la señal se la digitaliza en forma de pulsos de 5V a esto se le denomina detector de cruce por cero; estos pulsos ingresan a un *flip-flop*³⁷, que es el encargado de analizar los datos y dar como salida una señal que contiene la información de la secuencia de fases, antes de enviarla a los led's de visualización es necesario amplificar la corriente de esta señal.

En la figura 3-11 se muestra el diagrama esquemático del Indicador de secuencia de fases, K-304 de *CEKIT*³⁸; este circuito trabaja con una batería de 9 voltios y proporciona una indicación visual de la secuencia de las fases.

Tomando como base el funcionamiento del circuito descrito en la figura 3-11, se realiza la adaptación del mismo para que funcione a niveles de voltaje TTL, para ello se empieza por cambiar los valores de las resistencias R1, R2 y R3 para que disipen menor cantidad de potencia, pero que a la vez operen de la misma forma atenuando la señal de entrada y proporcionando el desfase de 120° característico existente entre fase y fase.

La batería de 9V se reemplaza junto con el interruptor S1, por una bornera para ingresar la alimentación de la fuente de 5V.

El pulsador de *test* no se lo incluye, se conecta directamente el punto común de las resistencias a la fuente de alimentación.

³⁷ **Flip-Flop:** Circuito biestable que cambia de estado cada vez que recibe una señal de entrada de nivel alto o bajo, mantienen el dato de salida aunque desaparezca el de la entrada.

³⁸ Compañía Editorial Tecnológica, Pereira – Colombia.

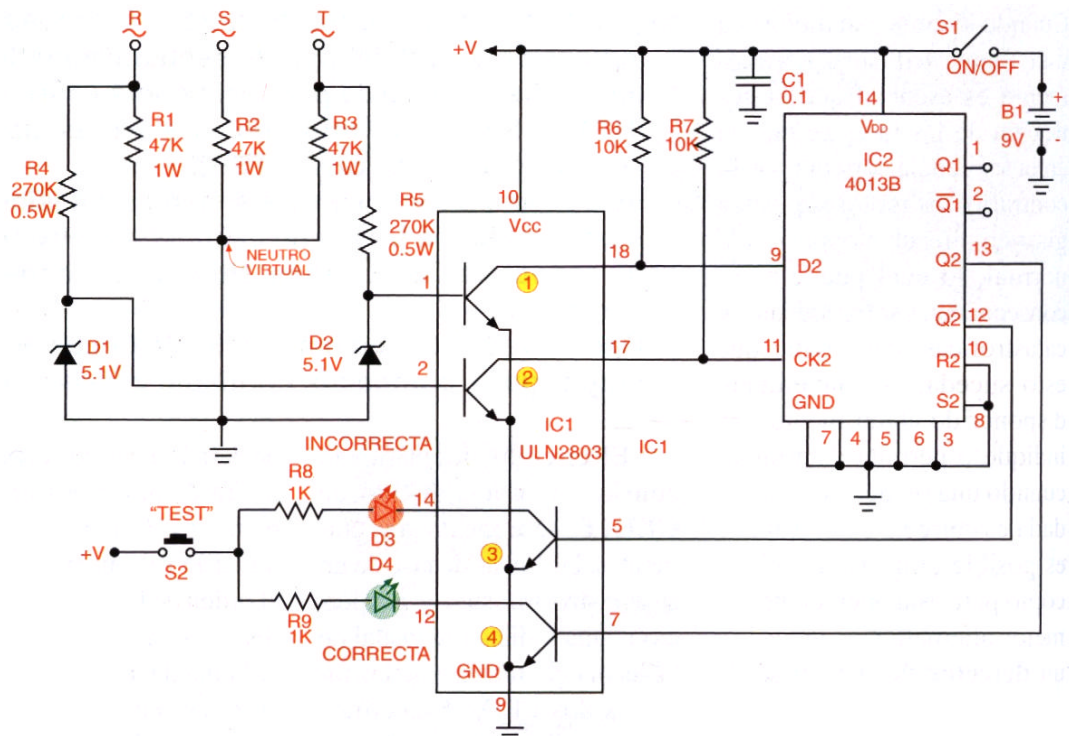


Figura 3—11 Indicador de secuencia trifásica.

El Circuito Integrado 4013B es un flip-flop tipo D y es de tecnología C-MOS, éste se cambia por el C.I. 74HC74 que es un flip-flop de tipo D de alta velocidad y que opera a niveles TTL.

La salida de información se adapta de manera que entregue señal digital compatible con el microcontrolador para que sea procesada de acuerdo a los requerimientos del sistema, este proceso lo efectúa el C.I. ULN2803 que es un arreglo de transistores montados en configuración Darlington, que maneja alta corriente; hasta 500mA.

Para describir el funcionamiento se toma como referencia el circuito de la figura 3-11, en la figura 3-12 (a) se indica la secuencia normal de fases a la entrada R-S-T en un sistema trifásico, la señal es atenuada por las resistencias R1, R2 y R3.

A la señal senoidal de la fase R se la acondiciona a una señal cuadrática por medio del transistor 2 del C.I. ULN2803, teniendo a la salida de éste la señal cuadrada de la figura 3-12(b), la misma que se encuentra en fase con los

semiciclos negativos de la fase R; esta señal se la conecta como reloj al pin CK del flip-flop.

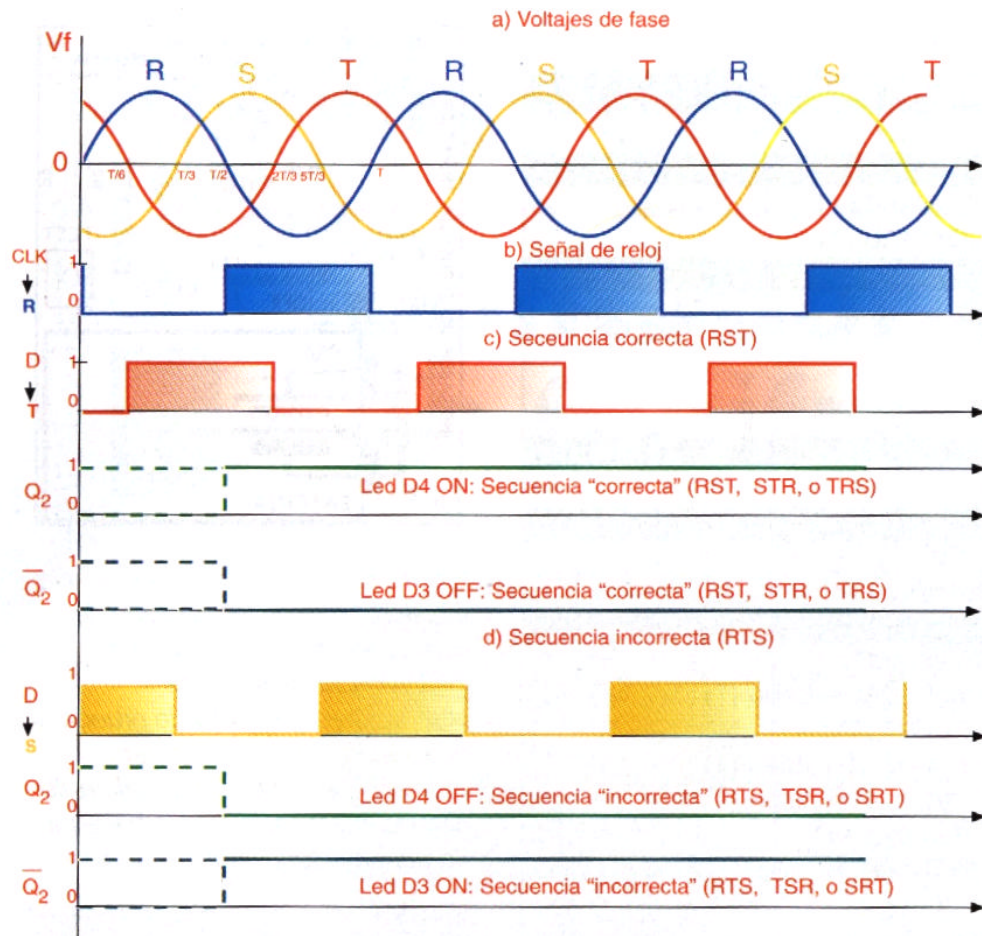


Figura 3—12 Método de detección de la secuencia de fases.

La fase T se la convierte con el mismo procedimiento empleado para la fase R, esta señal acondicionada por el transistor 1 del C.I. ULN2803, se conecta al pin de datos D del flip-flop; el análisis de los datos empieza con los flancos de bajada de la onda cuadrada que ingresa al reloj y al pin de datos; es decir, se emplea los cruces por cero, entonces cuando el flip-flop recibe un pulso de reloj acepta el dato que se encuentra en el pin D, éste puede ser un 1 ó un 0, dependiendo de la polaridad de la fase aplicada a la entrada T .

Si la secuencia de fases es positiva, o sea, RST, STR ó TRS; como lo muestra la figura 3-12 (c), la entrada T es negativa; por lo tanto, el transistor 1 del UL2803 no se activa permitiendo que ingrese un 1 lógico al pin D del flip-flop, y mientras se

mantenga esta secuencia de datos a la salida Q del flip-flop, se tendrá un 1 lógico indicando que la secuencia de fases es la correcta.

Si en la entrada T se conecta la fase S, ocurre lo que se indica en la figura 3-12 (d), la secuencia de fases es negativa, pudiendo ser ésta RTS, SRT ó TSR, al activarse el transistor 1 del ULN2803 ingresa un 0 lógico como dato en el pin D, la salida \bar{Q} del flip-flop se pone en alto; es decir, se tiene un 1 lógico que indica que la secuencia de fases es incorrecta. Estas dos señales Q y \bar{Q} son los datos que son enviados al microcontrolador, las variables designadas para la secuencia son *Secred* y *Secgen*.

3.3.4 Medición de corriente.

Para medir la corriente se empleará como sensor el módulo 010.421 del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, este módulo consiste en dos transformadores de corriente.

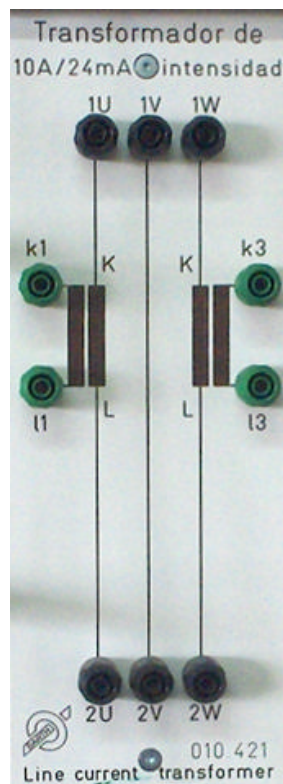


Figura 3—13 Transformador de corriente 010.421

El transformador de corriente o TC que se indica en la figura 3-13, entrega una señal de corriente proporcional de 10A / 24mA, tiene una capacidad de 50% de sobrecarga, es de clase 1.0 y tiene una impedancia de carga máxima de 420Ω ³⁹, y está encapsulado en resina epoxi. Referirse a la sección 2.3.2 donde se realiza el respectivo análisis de los datos técnicos del TC.

La señal de corriente que proporciona la salida del módulo en los terminales K1 – L1 y K3 – L3 debe ser transformada a voltaje; para ello se emplea una resistencia cuyo valor deber ser calculado, tomando en cuenta ciertos parámetros de diseño que deben ser analizados.

Empleando la ley de Ohm expresada por la ecuación 3.2 se obtiene un valor de $R1 = 208.3\Omega$, cuando la corriente es la máxima de 24mA, según los datos técnicos del TC empleado, el voltaje de salida es de 5 Vrms para el cálculo realizado, en la figura 3-14 se muestra el circuito de acondicionamiento empleado para convertir la señal de corriente en voltaje.

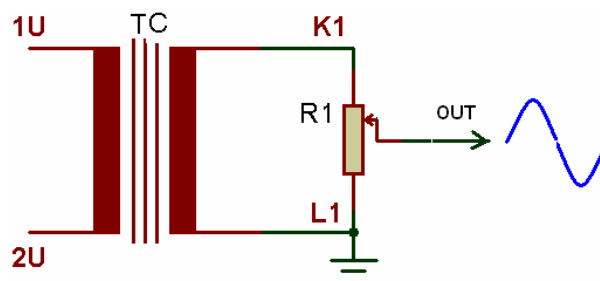


Figura 3—14 Circuito de acondicionamiento para medir la corriente.

La corriente que entrega el generador en condiciones nominales es de 0.5A, esto quiere decir que cuando circule esta corriente por el primario del TC, en el secundario se tendrá una corriente de 1.2 mA correspondiente a un voltaje de 0.25V. Es conveniente entonces, emplear un amplificador para poder tener mayor

³⁹ Datos técnicos tomados de: Jiménez M., Taipe F., "Sistema de adquisición de datos para determinar las características de operación con carga de los motores trifásicos de inducción para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas", Trabajo de Grado de Ingeniería Electromecánica, Escuela Politécnica del Ejercito, Latacunga, año 2005.

control de la señal, en la figura 3-15 se describe el circuito empleado para amplificar y acondicionar la señal de corriente.

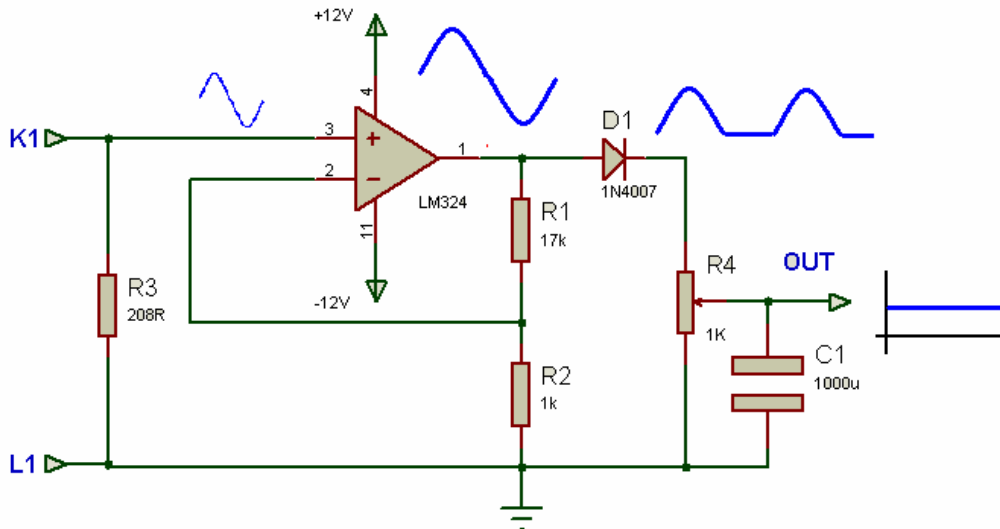


Figura 3—15 Amplificador y acondicionamiento de corriente.

El amplificador está configurado para tener una ganancia de 18, por lo tanto a la salida del amplificador se tendrá un voltaje de 4.49V cuando a la entrada ingresen 0.25V, las resistencias los valores de $R1 = 17K$ y $R2 = 1K$, sirven para obtener la ganancia en el amplificador. El diodo D1 convierte la senoidal en una señal pulsante de media onda, esta señal se la rectifica con valores seleccionados de $C1 = 1000\mu F$, la resistencia R4 sirve para descargar el condensador C1. Según la ecuación 3.6 se obtiene un rizado de 0.001039 que equivale al 0.109% de componente alterna presente en el voltaje DC de salida.

La potencia disipada en R4 según la ecuación 3.1 es, $P = 0.025W$; por lo tanto para regular el valor de resistencia calculado se decide emplear un potenciómetro de precisión, ya que la potencia requerida está dentro de los valores de trabajo del mismo.

3.3.5 Medición del ángulo entre voltaje y corriente.

Para medir el ángulo de desfase Δ (delta) existente entre el voltaje y la corriente, es necesario acondicionar las dos señales por separado y asegurando que la

onda cuadrada resultante tenga el mismo período que la señal senoidal original, tal como lo describe la figura 3-16.

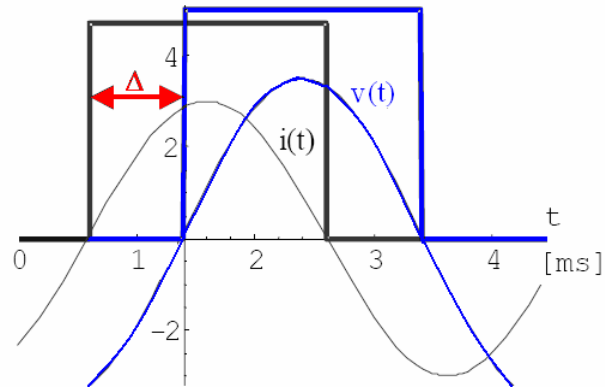


Figura 3—16 Ondas de Voltaje y Corriente.

En la sección 3.3.2 se analizó la conformación de la onda de voltaje para medir la frecuencia, esta señal es utilizada también para determinar el desfase existente, ya que posee el mismo periodo de la onda de voltaje fundamental y el nivel lógico de voltaje soportado por el microcontrolador.

Para formar la señal de corriente se aplica el mismo principio de la formación de la onda para medir la frecuencia, las modificaciones y disposición del circuito se muestra en la figura 3-17.

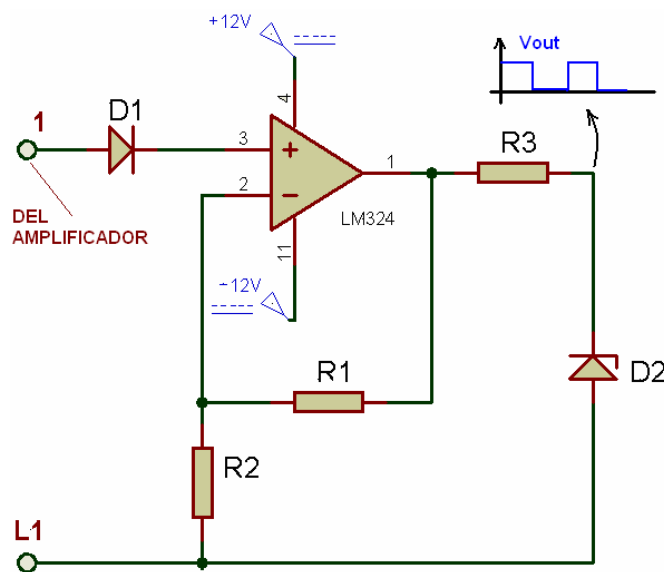


Figura 3—17 Circuito de conformación de la Corriente.

El primer paso es tomar la señal corriente que proviene del nodo K1, donde se conecta un diodo D1 para recortar los ciclos negativos de la onda, la salida del diodo se conecta a la entrada no-inversora del amplificador operacional LM324, que está configurado como no-inversor.

Los valores de resistencia de R1 y R2 se calculan tomando en cuenta la ecuación 3.7, se debe asegurar que la onda sea lo más cuadrada posible, para ello se debe seleccionar valores de resistencia adecuados, a la salida del amplificador operacional el voltaje máximo que se puede obtener es el voltaje aplicado como referencia (12V); por lo tanto a, mayor ganancia empleada por la relación entre R1 y R2 no se verá afectada la salida sino por el contrario se mejora la señal cuadrada.

El valor de R3 sirve para asegurar una circulación de corriente segura por el diodo D2 que consiste en un zener que recorta la señal de salida a 5V, la figura 3-18 muestra la gráfica de la señal de entrada en conjunto con la señal de salida de la corriente que circula por la fase T.

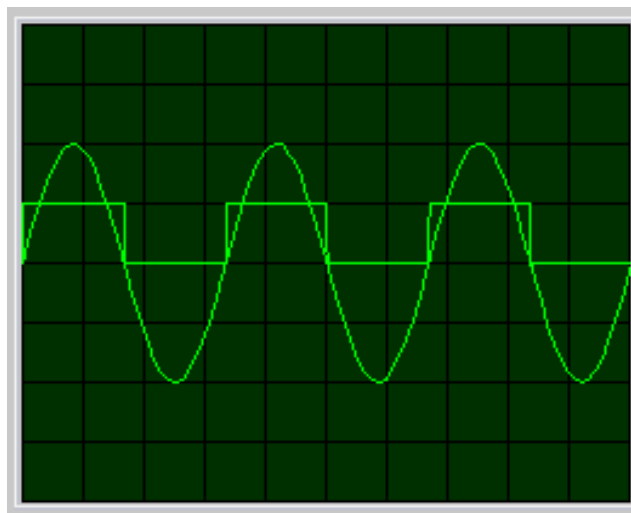


Figura 3—18 Onda de corriente conformada.

Una vez adquiridas estas dos señales; son enviadas al microcontrolador, donde mediante un algoritmo determina el tiempo que existe entre las ondas, necesario para calcular el ángulo de desfase *Delta* (Δ).

3.3.6 Potencia entregada.

Una vez adquiridos todos los parámetros eléctricos del generador, resta determinar la potencia que entrega el mismo. Para determinar el triángulo de potencias se emplea el método analítico, éste consiste en crear un algoritmo en el microcontrolador que realice los cálculos cada cierto tiempo y los presente. Este procedimiento se describe detalladamente en el siguiente capítulo.

3.4 Señales de control.

En la tabla 3-2 se describió las señales que son necesarias, para comandar a los actuadores que controlarán los parámetros del generador.

3.4.1 Control de velocidad.

Para dotar de potencia mecánica al generador sincrónico, se utilizará como máquina motriz el motor de inducción de *rotor jaula de ardilla*⁴⁰ (Barth 004.003) acoplado al variador de frecuencia ACS 300, disponibles en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas; la placa de características del motor se indican en la tabla 3-4. En el Anexo B se muestra la forma de conexión del variador y los parámetros de ajuste necesarios para realizar el control de velocidad del motor.

Type: ADK 71-4	
Nr. 004.003	IP: 00
V: Y220	A: 1.75
KW: 0.3	Cos ϕ : 0.74
RPM: 1630	Hz: 60
VDE 0530/72	

Tabla 3—4 Placa de características Motor 004.003.

Para realizar el control de velocidad, es necesario entonces controlar al variador de frecuencia desde el *Módulo de Sincronización Automático*, para ello se debe

⁴⁰ **Rotor jaula de ardilla:** Los conductores del rotor están igualmente distribuidos por la periferia del rotor, los extremos de estos conductores están cortocircuitados, por lo tanto no hay posibilidad de conexión del devanado del rotor con el exterior.

generar una señal DC analógica; es decir, una señal de 0 a 10V que se deben conectar a los bornes 2 y 3 del variador, la señal de control se envía desde el microcontrolador y reemplaza al potenciómetro que indica la figura 3-19, esta figura muestra todos los bornes disponibles para realizar el control del variador, de ellos se utilizará el borne 6 (DI1) que permite arrancar el variador en configuración de giro horario, y el borne 7 (DI2) que permite invertir el giro.

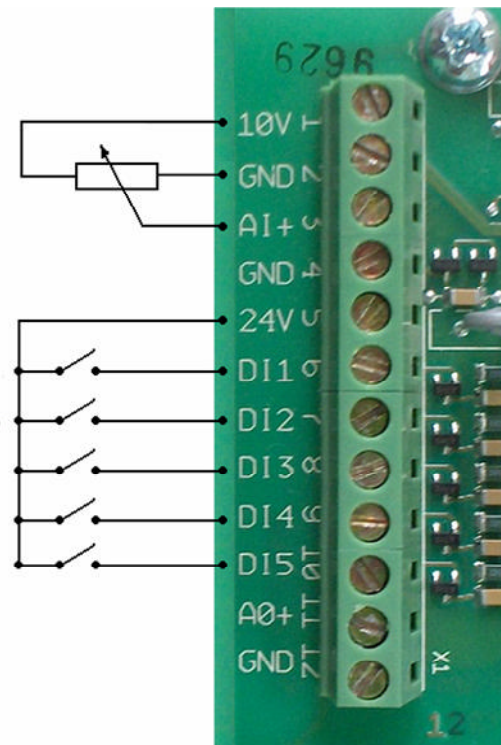


Figura 3—19 Bornes de entrada/salida del ACS 300.

Para generar la señal DC, se debe utilizar una conversión Digital a Analógica, para ello se puede emplear un conversor D/A. Sin embargo, la conversión D/A también se la puede realizar por medio del microcontrolador empleando la técnica de control *PWM*⁴¹.

El control PWM es una técnica utilizada por los sistemas digitales, para controlar, por medio de salidas de tipo digital a circuitos analógicos. La señal PWM consiste en una onda cuadrada de alta frecuencia tal como lo muestra la figura 3-20, cuyo

⁴¹ **PWM:** (Pulse Width Modulation) Modulación por ancho de pulso.

ciclo útil es modificado a fin de aplicar en el intervalo de tiempo que dura el periodo de la señal, una tensión promedio equivalente a éste.⁴²

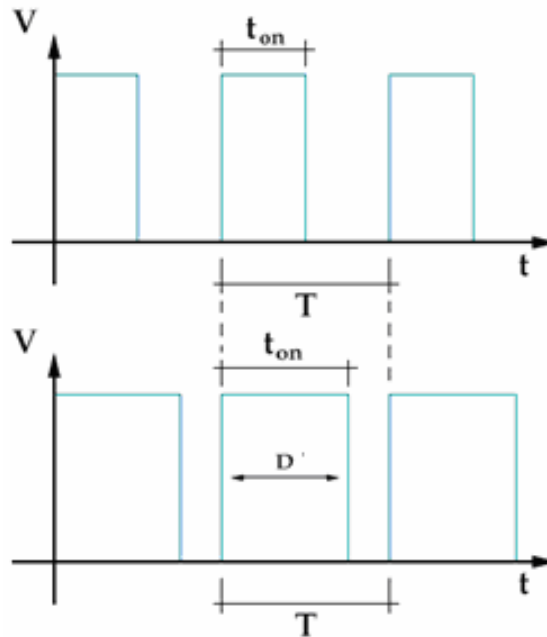


Figura 3—20 Modulación por ancho de pulso.

donde: t_{on} es el tiempo en que el pulso permanece en alto.
 T es el periodo del pulso cíclico de la señal.
 D es el ciclo de trabajo o *duty cycle*.

El ciclo de trabajo está definido por la ecuación 3.8, el ciclo de trabajo (D) siempre toma un valor entre 0 y 1.

La frecuencia de la señal cíclica generada se determina según la ecuación 3.9, a tensión DC promedio se determina según la ecuación 3.10.

$$D = \frac{t_a}{T_{PM}} \quad (3.8)$$

$$f_{PM} = \frac{1}{T_{PM}} \quad (3.9)$$

⁴² http://www.roso-control.com/_Download/Cursos/MDK-B28/Cap_No_06.pdf

$$V = D * V \quad (3.10)$$

Para convertir la señal PWM en voltaje analógico es necesario filtrar los pulsos y mantener el voltaje promedio, para ello se emplea un filtro RC. Para determinar los valores apropiados tanto para R como para C, se emplea la ecuación 3.11, donde se desea obtener el tiempo t_0 para que cumpla que V_{dc} sea el 98% de V_{in} obteniendo la ecuación 3.12.

Se puede asegurar entonces que cuando transcurre un tiempo igual o mayor a t_0 el condensador se encontrará cargado a una tensión igual a la tensión V_{dc} aplicada.⁴³

$$V = V * \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3.11)$$

$$t_0 = 4RC \quad (3.12)$$

El microcontrolador entrega el tren de pulsos comprendidos entre 0 y 5V (señal digital) a la frecuencia seleccionada, si se aplica el filtro RC a la salida se obtendría un voltaje analógico 0 a 5V, es necesario entonces amplificar esta señal para que entregue el voltaje analógico de 0 a 10V, necesarios para controlar el variador de frecuencia.

Para la amplificación de voltaje de 5 a 10V se ha empleado transistores montados en configuración Darlington, los transistores deben seleccionarse tomando en cuenta la frecuencia PWM de 6KHz a la que deben trabajar, en la figura 3-21 se muestra la disposición del circuito empleado para generar la señal requerida para el control, los valores de las resistencias son: $R1 = 4.7K\Omega$, $R2 = 2K\Omega$, $R3 = 1K\Omega$; éstas sirven para polarizar a los transistores. $R4$ y $C1$ funcionan como filtro y sus valores son: $R4 = 10K\Omega$, $C1 = 22\mu F$.

⁴³ http://www.roso-control.com/Espanol/EDU/MICRO/70_Proyectos/28_Gen_Onda/Paper_Final.pdf

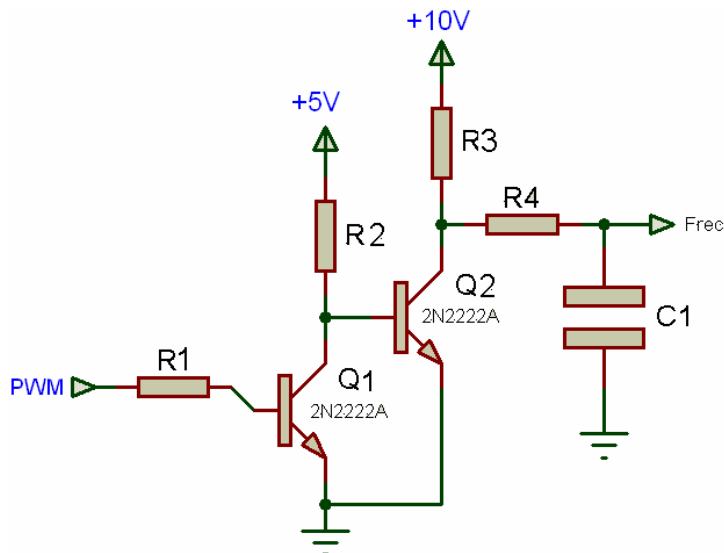


Figura 3—21 Circuito conversor D/A con PWM.

La frecuencia se ha seleccionado de la tabla 3-5 según el dispositivo empleado, y es generada por hardware del microcontrolador, los valores de las resistencias R1 y R2 sirven para asegurar la circulación de una corriente que active la base del transistor.

Oscilador	PIC18FXXX
4 MHz	245 Hz
8 MHz	489 Hz
10 MHz	611 Hz
12 MHz	733 Hz
16 MHz	977 Hz
20 MHz	1221 Hz
24 MHz	1465 Hz
33 MHz	2015 Hz
40 MHz	2442 Hz

Tabla 3—5 Frecuencia mínima según oscilador empleado.⁴⁴

La selección de los componentes de RC es arbitraria, pero debe cumplirse que el valor de t_0 sea mayor que un ciclo PWM; otra consideración importante es que mientras mayor sea el valor del condensador empleado, éste tendrá mayor capacidad de entregar corriente al circuito que lo descarga.

⁴⁴ http://www.todopic.com.ar/pbp_sp.html

3.4.2 Control de Campo de excitación.

Para conseguir que el sistema controle la corriente de campo, se emplea el circuito de acondicionamiento indicado en la figura 3-22, éste tiene como base la generación de pulsos con modulación PWM, como se explica en la sección 3.4.1, una de las formas de obtener voltaje DC analógico para control es emplear esta técnica.

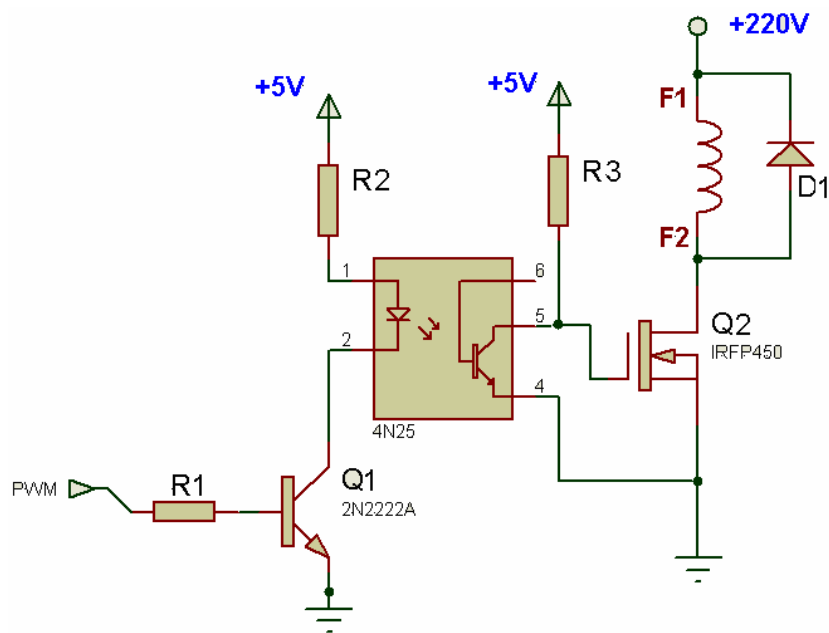


Figura 3—22 Circuito de control de campo.

Para este caso puntual de control es necesario emplear elementos electrónicos para adaptar el nivel de tensión TTL generado por el microcontrolador, a una tensión analógica de 0 a 120VDC requerida por el devanado de campo del generador. La fuente de tensión de 0 a 120VDC se obtiene al rectificar y filtrar la señal generada por un transformador de 220 a 110.

Es importante aislar la tierra de los dos circuitos de control y de potencia, ya que si se sobrepasa las corrientes que manejan los circuitos de baja potencia, puede ocasionar daños irreparables en los mismos, para este propósito se emplea el C.I. 4N25, que consiste en un optoacoplador con fototransistor.

El circuito de potencia está compuesto por un *Mosfet*⁴⁵ de canal N. La figura 3-23 describe la estructura física de este dispositivo, en ella se muestran sus terminales: puerta (G), drenador (D), fuente (S) y sustrato (B), normalmente el sustrato se encuentra conectado a la fuente; la puerta está separada del sustrato por un dieléctrico, formando una estructura similar a las placas de un condensador. Al aplicar una tensión positiva en la compuerta, se induce cargas negativas (capa de inversión) en la superficie del sustrato y se crea un camino de conducción entre los terminales drenador y fuente. La tensión mínima para crear la capa de inversión se denomina tensión de umbral o *threshold* V_T , y constituye un parámetro característico del transistor.

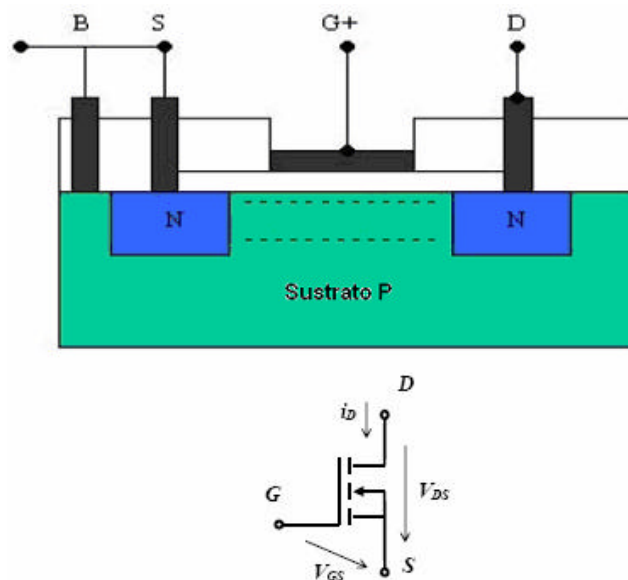


Figura 3—23 Estructura física de un transistor NMOS.

Si $V_{GS} < V_T$, la corriente drenador-fuente I_D es nula, valores típicos de esta tensión son 0.5 a 3V, el MOSFET se encuentra en la región de corte.

Si $V_{GS} - V_T < V_{DS}$, la corriente I_D es constante (independiente de V_{DS}), el transistor entra en la región de saturación.

⁴⁵ Los transistores MOSFET (MOS: Metal Oxido Semiconductor) son dispositivos de efecto de campo controlados por tensión con una alta impedancia de entrada, son capaces de manejar niveles de tensión y corriente elevados. Existen dos tipos de transistores MOS: MOSFET de canal N o NMOS y MOSFET de canal P o PMOS.

Si $V_{GS} - V_T > V_{DS}$, $I_D = k \cdot \left(\frac{W}{L} \right) \cdot \left((V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$ I_D forma una parábola, el transistor se encuentra en la región lineal, en esta región el transistor se comporta como un interruptor cerrado, con una resistencia para valores muy pequeños de V_{DS} .

Si $V_{DS} > V_{BD}$, el transistor ingresa a la zona de ruptura. Un transistor MOS puede verse afectado por fenómenos de avalancha en los terminales drenador y fuente, roturas en la capa de óxido fino puede ocasionar daños irreversibles al dispositivo. La figura 3-24 muestra la curva característica de un transistor NMOS.

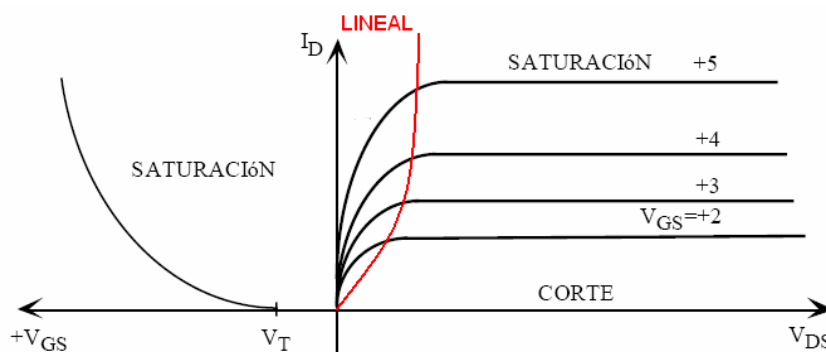


Figura 3—24 Curva característica de un transistor NMOS.

El MOSFET usado para este proyecto es el IRFP450 cuyas características técnicas se encuentran en el Anexo A. Para seleccionar adecuadamente los elementos de polarización de este dispositivo se debe tomar en cuenta las regiones de trabajo indicadas en la figura 3-24, en conjunto con los datos técnicos proporcionados por el fabricante del transistor.

Se ha decidido emplear transistor MOSFET debido a su capacidad de manejar altas potencias y a sus tiempos de conmutación muy rápidos, necesarios para realizar el control PWM. Es necesario además conectar un diodo (D1) en paralelo con la bobina de campo del generador sincrónico para proteger al transistor de las tensiones inducidas.

3.5 Ingreso y visualización datos.

Para el ingreso a los parámetros y para operación del *Módulo de Sincronización Automático* se emplea un teclado, el cual consta internamente de cuatro pulsadores contenidos en una placa de baquelita, la figura 3-25 muestra el diseño realizado para el teclado de control. Éste se conectará a la placa principal por medio de un bus de datos.



Figura 3—25 Circuito de control de campo.

En el siguiente capítulo se describe la función de cada tecla. De manera general, las teclas F1 F2 y F3 sirven para acceder a los parámetros y la tecla denominada como ENTER tiene como finalidad aceptar el acceso a la operación elegida por el usuario.

La parte de visualización está a cargo de un *LCD*⁴⁶ alfanumérico de 20 caracteres por 4 filas marca QY 2004A, los caracteres se muestran en led de color blanco con luz de fondo azul. La tensión nominal de alimentación es de 5 Vdc y consume menos de 20 mA. El aspecto físico del LCD se muestra en la figura 3-26.



Figura 3—26 LCD QY2004A.

⁴⁶ LCD: Display de Cristal Líquido.

Los caracteres del LCD están constituidos por una matriz de 5 x 8 puntos para representar un carácter. En total se pueden representar 256 caracteres diferentes, 240 caracteres están grabados dentro del LCD y los constituyen las letras mayúsculas, minúsculas, signos de puntuación, etc. Además 8 caracteres pueden ser definidos por el usuario.

En la tabla 3-6 se detallan las señales necesarias para el funcionamiento y control del LCD.

Pin	Nombre	E/S	Descripción
1	Vss	--	Referencia de voltaje a 0V.
2	Vdd	+	Voltaje de alimentación.
3	V0	E	Voltaje de ajuste del contraste.
4	RS	E	Selección del registro, selecciona el registro interno sobre el cual se va a leer o escribir, los registros son de control si está en bajo y de datos si esta en alto.
5	R/W	E	Lectura/Escritura, si se encuentra en alto se lee el LCD, si está en bajo se escribe en el LCD.
6	E	E	Enable, es la señal de validación de los datos, cuando no se usa el LCD esta señal debe permanecer en bajo.
7 – 14	D0 - D7	E/S	Bits de datos, se puede configurar para trabajar a 8 o 4 bits, siendo la ultima la más empleada para ahorrar pines del microcontrolador.
15 /16	LED+ / LED-		Encienden la luz de fondo del LCD

Tabla 3—6 Distribución de pines del LCD.

El LCD puede trabajar con datos de 4 u 8 bits. Si se elige la configuración de 4 bits para transmisión de datos de control del LCD, se tiene una reducción de la velocidad de transmisión, esta disminución de velocidad es imperceptible al ojo humano ya que el LCD trabaja en el orden de los microsegundos. Si se elige utilizar los 8 bits para transmisión de datos, es necesario ocupar 4 pines más del microcontrolador.

Para realizar el control de contraste se debe ingresar una tensión de 0 a 5V por el pin *VO*, la tensión típica es de 0.6V.

Normalmente se coloca un potenciómetro para ajustar el contraste más adecuado, en la figura 3-27 se muestra la conexión típica para conectar el LCD y el microcontrolador.

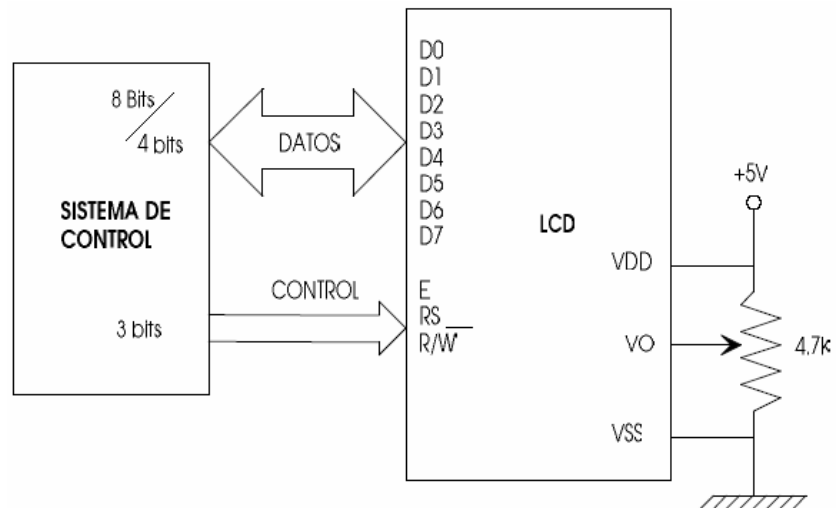


Figura 3—27 Interfaz del LCD con un sistema de control.

Para poder escribir en la pantalla del LCD, se debe tener en cuenta el mapa posición del LCD, esto permite tener acceso a cualquier posición dentro de la pantalla y se indica en la figura 3-28.

80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	8A	8B	8C	8D	8E	8F	90	91	92	93
C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	CA	CB	CC	CD	CE	CF	D0	D1	D2	D3
94	95	96	97	98	99	9A	9B	9C	9D	9E	9F	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
D4	D5	D6	D7	D8	D9	DA	DB	DC	DD	DE	DF	E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7

Figura 3—28 Mapa de direcciones del LCD 20x4.

Para este proyecto se decidió emplear la configuración del LCD a 4 bits, para asignar otras funciones a los pines ahorrados en la conexión con el LCD.

3.6 Elección del Microcontrolador.

Para elegir el microcontrolador a emplear en el diseño de este proyecto se debe tener en cuenta varios factores, como la documentación y herramientas de desarrollo disponibles y su costo, la cantidad de fabricantes que lo producen y por supuesto las características del microcontrolador (tipo de memoria de programa, número de temporizadores, interrupciones, etc.).⁴⁷

Antes de seleccionar un microcontrolador es imprescindible analizar los requisitos de la aplicación:

- *Procesamiento de datos:* puede ser necesario que el microcontrolador realice cálculos críticos en un tiempo limitado. En ese caso se debe seleccionar un dispositivo suficientemente rápido para ello. También se debe tomar en cuenta la precisión de los datos a manejar: si no es suficiente con un microcontrolador de 8 bits, puede ser necesario acudir a microcontroladores de 16 ó 32 bits.
- *Entradas/Salidas:* se debe determinar las E/S del sistema, es conveniente conocer el número y tipo de variables del proceso, de tal forma que sea sencillo identificar la cantidad y tipo de señales a controlar. Una vez realizado este análisis se puede elegir un dispositivo con el número necesario de puertos de E/S, o se puede ver la necesidad de añadir periféricos externos o cambiar a otro microcontrolador más adecuado a ese sistema.
- *Memoria:* para determinar la cantidad de memoria necesaria, se debe hacer una estimación de cuánta memoria volátil y no volátil se empleará y si es conveniente disponer de memoria no volátil modificable.
- *Ancho de palabra:* el criterio de diseño debe ser seleccionar el microcontrolador de menor ancho de palabra que satisface los requerimientos de la aplicación. Usar un microcontrolador de 4 bits supondrá una reducción en los costes importante, mientras que uno de 8 bits puede ser el más adecuado si el ancho de los datos es de un byte. Los microcontroladores de 16 y 32 bits, debido a su elevado coste, deben

⁴⁷ http://www.hobbypic.com/index.php?option=com_content&task=section&id=3&Itemid=27

reservarse para aplicaciones que requieran altas prestaciones (E/S potente o espacio de direccionamiento muy elevado).

- *Diseño de la placa:* la selección de un microcontrolador concreto condicionará el diseño de la placa de circuitos. Deberá tenerse en cuenta el encapsulado del mismo.

Realizando el análisis del número y tipos de variables que hace referencia la tabla 3-1 y 3-2, se concluye que se debe disponer de 4 entradas análogas y 5 entradas digitales, además de 3 pines de salida para control.

Se debe asignar también 6 pines de E/S para manejar el LCD, 4 pines para manejar el teclado matricial. Para establecer la comunicación serial se debe disponer de dos pines, transmisor y receptor.

Por lo tanto el microcontrolador a emplear debe disponer de al menos 29 pines de E/S, aparte de los pines asignados para la alimentación y conexión del oscilador.

De los 29 pines de E/S, 6 deben ser canales análogos. El microcontrolador debe poseer control PWM por hardware, y su funcionamiento debe ser independiente, permitiendo realizar otras actividades de control o adquisición sin interrumpir la señal PWM. Al igual que el módulo PWM es necesario disponer de un módulo para comunicación serial por hardware.

Debido a los requerimientos del sistema de adquisición y control de datos el dispositivo debe poseer como mínimo un ancho de palabra de 8 bits.

Un dato importante que se debe considerar es la disponibilidad local del dispositivo, este es un parámetro que limita el desarrollo de aplicaciones con microcontroladores. En nuestro medio se dispone de microcontroladores de 18, 28 y 40 pines con encapsulado tipo DIP.

Según el análisis efectuado, el microcontrolador más apropiado para desarrollar este proyecto es el PIC18F452 de Microchip, este es un microcontrolador de 40

pinos con encapsulado tipo DIP de última tecnología, la figura 3-29 indica la foto de dicho microcontrolador.

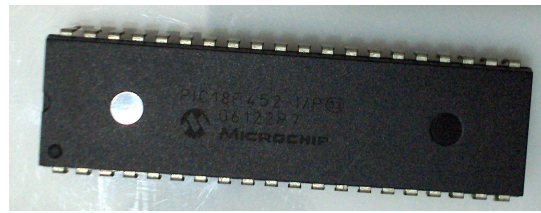


Figura 3—29 PIC18F452 - empaquetado DIP 40.

En la tabla 3-7 se muestra la asignación de las variables a cada pin del microcontrolador.

#	Nombre de variable	PIN del microcontrolador asignado	# PIN
1	Vred	RA0	2
2	Fred	RA4	6
3	Secred	RE0	8
4	Vdif	RC3	18
5	Vgab	RA1	3
6	Vgcb	RA2	4
7	Ia	RA3	5
8	Ic	RA5	7
9	Fgen	RC0	15
10	Secgen	RE1	9
11	Fduty	RC2	17
12	Vduty	RC1	16
13	Onrele	RC4	23
14	Fvgen2	RE2	10
15	Figen1	RD0	19
16	Figen2	RD1	20
17	RS	RB2	35
18	E	RB3	36
19	D4	RB4	37

20	D5	RB5	38
21	D6	RB6	39
22	D7	RB7	40
23	ENTER	RD4	27
24	F1	RD7	30
25	F2	RD6	29
26	F3	RD5	28
27	TX	RC6	25
28	RX	RC7	26
29	No utilizado	RB0	33
30	Onvar	RD2	21
31	Invgir	RD3	22
32	No utilizado	RB1	34
33	No utilizado	RC5	24
34	Cristal 20Mhz	OSC1	13
35	Cristal 20MHz	OSC2	14
36	Reset	MCLR	1
37	Fuente 5V	VDD	11
38	GND	VSS	12

Tabla 3—7 Asignación de pines del microcontrolador.

CAPITULO IV

4 DISEÑO DEL SOFTWARE.

4.1 Introducción.

La interfaz del usuario debe proveer la funcionalidad necesaria para una buena comunicación entre el hombre y la máquina. Un buen diseño garantiza el uso de una aplicación, tanto al visualizar la información más importante, como al realizar las tareas para las que se desarrolló la aplicación. El diseño de la interfaz debe realizarse de manera que la operación del módulo resulte simple e intuitiva al momento de manipular los controles.⁴⁸

El diseño del software se lo dividió en dos partes: la primera es la parte de programación y grabación del microcontrolador, la segunda parte constituye el diseño de una aplicación de interfaz gráfica y la comunicación de ésta con el módulo de control.

4.2 Programación del microcontrolador.

La programación del microcontrolador es un proceso que se realiza en tres fases:

1. Escritura del programa.
2. Compilación del programa.
3. Grabación del programa compilado en la memoria del microcontrolador.

⁴⁸ <http://www.clubse.com.ar/download/password/newave/promosoft.htm>

Para la escritura del programa se necesita únicamente un editor de texto que permita editar y guardar el archivo.

Para *compilar*⁴⁹ el programa, se necesita un compilador del lenguaje de programación empleado en la escritura del código fuente. Los lenguajes de programación más comunes para los microcontroladores son el ensamblador, el C y el Basic. Generalmente, el fabricante del microcontrolador proporciona como mínimo el compilador en *lenguaje ensamblador*⁵⁰.

La grabación es el proceso que permite escribir el programa compilado en la memoria del microcontrolador. Existen varios tipos de programadores: desde los más completos que permiten trabajar con múltiples modelos de familias distintas, hasta los muy específicos que sólo sirven para unos pocos dispositivos. Para este proyecto se empleó el GTP USB PLUS, que se indica en la figura 4-1.

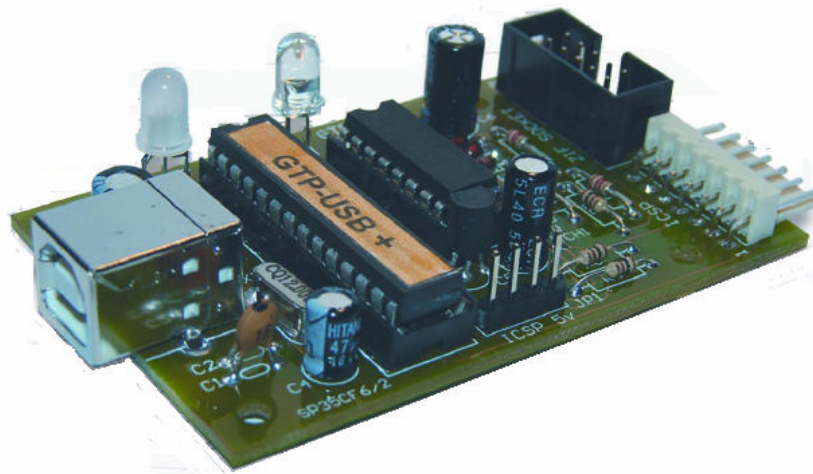


Figura 4—1 Hardware GTP USB PLUS

Este es un grabado de PIC's que usa el puerto USB de la computadora para transferir los datos, soporta la familia 18 que es la familia de microcontroladores

⁴⁹ **Compilador:** Es un programa capaz de generar aplicaciones que sean directamente utilizables en un ordenador o computadora. Un compilador lee el código fuente creado en un determinado lenguaje de programación, lo interpreta, comprueba su sintaxis y traduce a lenguaje o código máquina toda la serie de instrucciones, generando el archivo ejecutable final (programa compilado).

⁵⁰ **Lenguaje ensamblador:** Es un tipo de lenguaje de bajo nivel utilizado para escribir programas informáticos, y constituye la representación más directa del código de máquina específico para cada arquitectura de computadoras legible por un programador.

de Microchip más actual que se encuentra el mercado, este dispositivo viene incluido con el software WinPic800.

4.2.1 Lenguaje de programación mikroBasic.

Para la edición y compilación del programa se eligió el lenguaje de programación mikroBasic de la empresa mikroElektronika. El mikroBasic es un *compilador* de nueva generación que hace más fácil y rápida la programación de microcontroladores PIC de Microchip, ya que se basa en lenguaje Basic. La figura 4-2 muestra el entorno del mikroBasic.

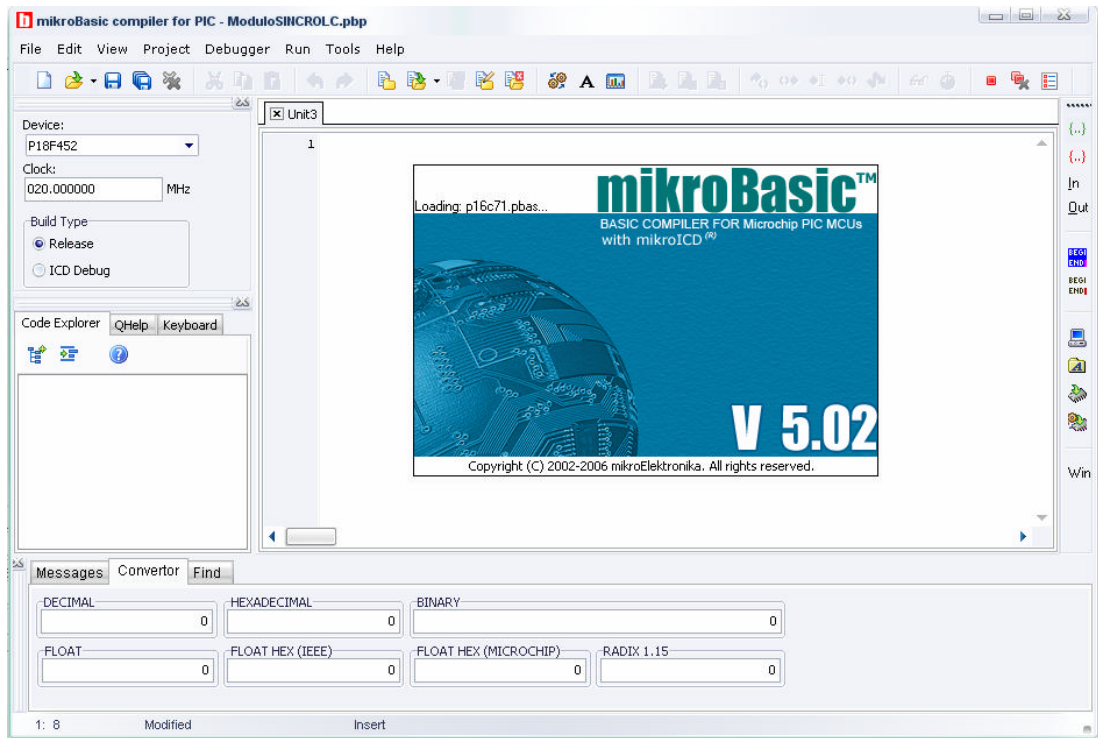


Figura 4—2 Ventana de programación de mikroBasic.

La principal característica de este compilador es que incluye una variedad de librerías que permite controlar de forma sencilla todos periféricos del microcontrolador para comunicaciones RS-232, RS-485 e I2C; teclados PS/2, conexiones USB, interfaz para LCD, etc. La descarga de este compilador se encuentra disponible de forma gratuita en la página web de miKroElektronika.

4.2.1.1 Organización interna del programa.⁵¹

Respecto de la organización interna del programa, es necesario estructurar el programa tomando en cuenta ciertas reglas en su escritura.

Básicamente, el código fuente consta de dos secciones: declaraciones y el cuerpo del programa, las declaraciones deben ir en la parte apropiada del código, organizadas de manera ordenada, de otra forma el compilador no será capaz de comprender el programa correctamente. Al momento de escribir el código, se debe seguir el modelo que se presenta a continuación:

```
program <nombre del programa>
include <incluir otros módulos>
!*****

Declaraciones Globales:
!*****

Declaraciones simbólicas
symbol ...

Declaración de constantes
const ...

Declaración de Variables
dim ...

Declaración de procedimientos
sub procedure nombre del procedimiento(...)
<Declaraciones locales>.....
.....
end sub

Declaración de funciones
sub function nombre de la función(...)
<declaraciones globales>....
.....
end sub

!*****
!* Programa principal
!*****

main:
En éste lugar se incluye los algoritmos para control y adquisición.
End.
```

⁵¹http://www.neoteo.com/Articulos/tabid/63/ID/1589/Title/Reloj_digital_parte_1_de_3_/Default.aspx

4.2.1.2 Tipo y declaración de datos.

Como en todo lenguaje de programación, las constantes y las variables son los dos elementos básicos de datos. En la tabla 4-1 se muestra los tipos de datos que maneja mikroBasic.

Tipo	Tamaño	Rango
Byte	8 bit	0 – 255
Char	8 bit	0 – 255
Word	16 bit	0 – 65535
Short	8 bit	-128 – 127
Integer	16 bit	-32768 – 32767
Longint	32 bit	-2147483648 – 2147483647
Float	32 bit	+/- 1.17549435082*10 ⁻³⁸ – +/- 6.80564774407*10 ³⁸

Tabla 4—1 Tipos de datos en mikroBasic.

Las constantes son datos cuyo valor se mantienen a lo largo de toda la ejecución del programa, en general se las usa para definir dimensiones, direcciones de memoria, cantidades, etc. Usar una constante en un programa no consume memoria RAM de un PIC. Una constante puede usarse en cualquier expresión, pero no se puede asignar otro valor.

Las constantes son declaradas en la sección de declaración de un programa. La sintaxis de declaración de una constante en mikroBasic es:

const *constant_name* [**as** *type*] = *value*

Cada constante es declarada bajo un único nombre, el cual debe ser un identificador válido. Una constante necesita que se especifique su valor (*value*) que es el valor numérico o carácter que se asigna a la constante. El tipo (*type*) es opcional; en la ausencia de éste, el compilador asume el tipo de dato más pequeño el cual se ajuste al tamaño del valor.

Las variables son datos cuyo valor puede ser alterado durante el tiempo de ejecución del programa mediante operaciones aritméticas o lógicas. Cada variable declarada consume una parte de la memoria RAM del PIC; el tipo de dato de la variable no solo delimita el rango de la variable, sino también determina el espacio usado en la memoria RAM del PIC.

Cada variable debe ser declarada antes de ser usada. Las variables Globales (aquellas que no están encerradas por ninguna rutina o procedimiento) son declaradas debajo de las cláusulas *include* y arriba de la etiqueta *main*.

La sintaxis para declarar una variable en mikroBasic es:

dim nombre_de_identificador as type

Donde *nombre del identificador* puede estar delimitado por una coma para separar diferentes nombres de identificadores y *type* es el tipo de dato soportado por mikroBasic

Un caso especial de variables, son los registros de funciones específicas del microcontrolador, los cuales no necesitan ser declarados, ya que todos son de tipo byte y son reconocidos por el programa como variables globales, su sintaxis es:

TRISB = % 00001111, configura a la mitad inferior del puerto B como entrada.

PORTB = % 11110000, pone en alto la mitad superior del puerto B.

4.2.1.3 Operadores aritméticos.

Los operadores aritméticos son usados para realizar cálculos matemáticos y regresan un valor numérico, los operadores aritméticos necesitan ser ambos con signo o ambos sin signo. Todos los operadores aritméticos se asocian de izquierda a derecha. La tabla 4-2 muestra los operadores aritméticos más importantes.

Operador	Operación	Operando	Resultado
+	Suma	Byte, word, short, integer, longint, float	Byte, word, short, integer, longint, float
-	Resta	Byte, word, short, integer, longint, float	Byte, word, short, integer, longint, float
*	Multiplicación	Byte, word, short, integer, float	Word, short, integer, longint, float
/	División (punto flotante)	Byte, short, integer, word, float	Byte, short, integer, word, float
DIV	División (con redondeo)	Byte, word, short, integer, longint, float	Byte, word, short, integer, longint
MOD	Módulo (resto de la división)	Byte, word, short, integer, longint	Byte, word, short, integer, longint

Tabla 4—2 Operadores aritméticos en mikroBasic.

El operador MOD no se debe usar con datos de tipo flotante, el operador DIV en cambio redondea el resultado al entero más cercano.

Si 0 (cero) es usado como el segundo operando (por ejemplo, x **div** 0) el compilador indicará un error y no generará el código. Pero en el caso de ser una división implícita; por ejemplo, x **div** y, donde y es igual a 0, el resultado será el máximo valor para el tipo de dato apropiado.

4.2.1.4 Estructuras de control condicionales e iterativas.

Las estructuras de control permiten tomar decisiones dentro de la ejecución del programa, existen dos tipos de estructuras, las condicionales **if - select case** y las iterativas **for – while**. La estructura **if** sirve para implementar una declaración condicional. La sintaxis es la siguiente:

```
if expresión then
  declaraciones_1
else
  declaraciones_2
end if
```

Si la *expresión* es verdadera se ejecutan el conjunto de *declaraciones_1*, si la expresión es falsa se ejecutan las *declaraciones_2*. Se puede omitir el uso del bloque **else** y sus delaraciones.

La estructura **select case** puede tomar n valores diferentes, para cada uno existe un conjunto de declaraciones que se pueden ejecutar. La sintaxis es la siguiente:

```
select case selector  
case valor_1  
declaraciones_1  
...  
case valor_n  
declaraciones_n  
end select
```

Primero el *selector* es evaluado, después el *valor* se compara con la lista de valores disponibles. Si un valor es encontrado, se ejecutan las declaraciones del valor encontrado.

La estructura **for** determina la ejecución de las declaraciones por cada ciclo de iteración, limitado por un valor n; su sintaxis es:

```
for contador = valor inicial to valor final [step valor de paso]  
declaraciones  
next contador
```

El *contador* es una variable que se incrementa según el *valor del paso* con cada iteración del ciclo. El parámetro *valor de paso*, es un valor entero opcional y si éste es omitido el valor por defecto es 1; antes de la primera iteración, el valor del *contador* es puesto al *valor inicial* y se incrementa mientras no exceda o no llegue al *valor final*, con cada iteración las declaraciones son ejecutadas.

Los valores iniciales y finales deben ser valores compatibles con el contador; las declaraciones pueden ser cualquier tipo, siempre y cuando no afecten el valor del

contador. El *valor de paso* puede ser un valor negativo, permitiendo hacer cuentas regresivas.

La estructura **while** se utiliza para condicionar una declaración de iteración. La sintaxis es:

```
while expresión  
declaraciones  
.....  
wend
```

El conjunto de *declaraciones* encerradas dentro del bucle, se ejecutan repetidamente mientras la expresión sea verdadera.

4.2.2 Diseño del *Firmware*.

El *firmware*⁵² es el programa que se ejecuta internamente en el PIC y es el encargado de recibir datos, administrarlos y generar señales de control.

Lo primero que debe realizar la aplicación es establecer una página de menú, donde se muestre las opciones que se pueden elegir para la operación del módulo. Una de las opciones debe permitir el monitoreo de los datos que proporcionan los sensores; una vez adquiridos estos valores, se requiere que la aplicación los muestre continuamente en la pantalla del LCD.

Para el control se debe crear un menú que permita elegir entre el control manual o automático del módulo. Si se elige el control automático se incluyen opciones para acceder a controlar la velocidad de la máquina motriz y otra para controlar el campo magnético.

⁵² **Firmware:** Son rutinas de software almacenadas en memoria de sólo lectura (ROM). A diferencia de la memoria de acceso aleatorio (RAM), la memoria de sólo lectura permanece intacta incluso cuando no existe un suministro de energía eléctrica. Las rutinas de inicio de la computadora y las instrucciones de entrada/salida de bajo nivel se almacenan como *firmware*, el *firmware* se encuentra a medio camino entre el *software* y el hardware.

Para iniciar la programación es necesario previamente configurar el microcontrolador para ocupar los módulos disponibles del mismo. Esta acción se la realiza eligiendo la opción *New Project* de la barra de tareas, allí se indica la familia del dispositivo, el tipo de oscilador, los módulos que se desea habilitar (CPP, USART) y deshabilitar (WDT), el nombre del proyecto y el directorio donde se guardarán los archivos, la figura 4-3 muestra la ventana de configuración del microcontrolador.

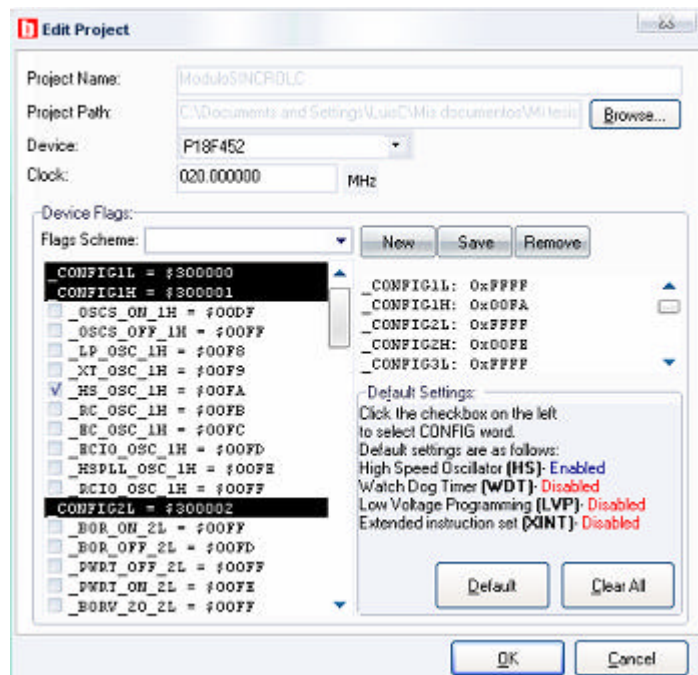


Figura 4—3 Ventana de configuración del dispositivo.

Para este proyecto se decidió utilizar un oscilador de alta velocidad (HS) de 20 Mhz, con WDT deshabilitado (porque en el diseño del programa no se usa), habilitación de los módulos Usart para comunicación y CCP para control.

4.2.2.1 Página Principal o página de Menú.

La página MENU es la página principal, donde se presentan todas las opciones de control que posee el Módulo Automático de Sincronización. Para presentar esta página se incluyen librerías que se usarán en todo el programa, la figura 4-4 muestra el diagrama de flujo que representa el proceso que realiza el microcontrolador para configurar los periféricos y presentar la página MENU.

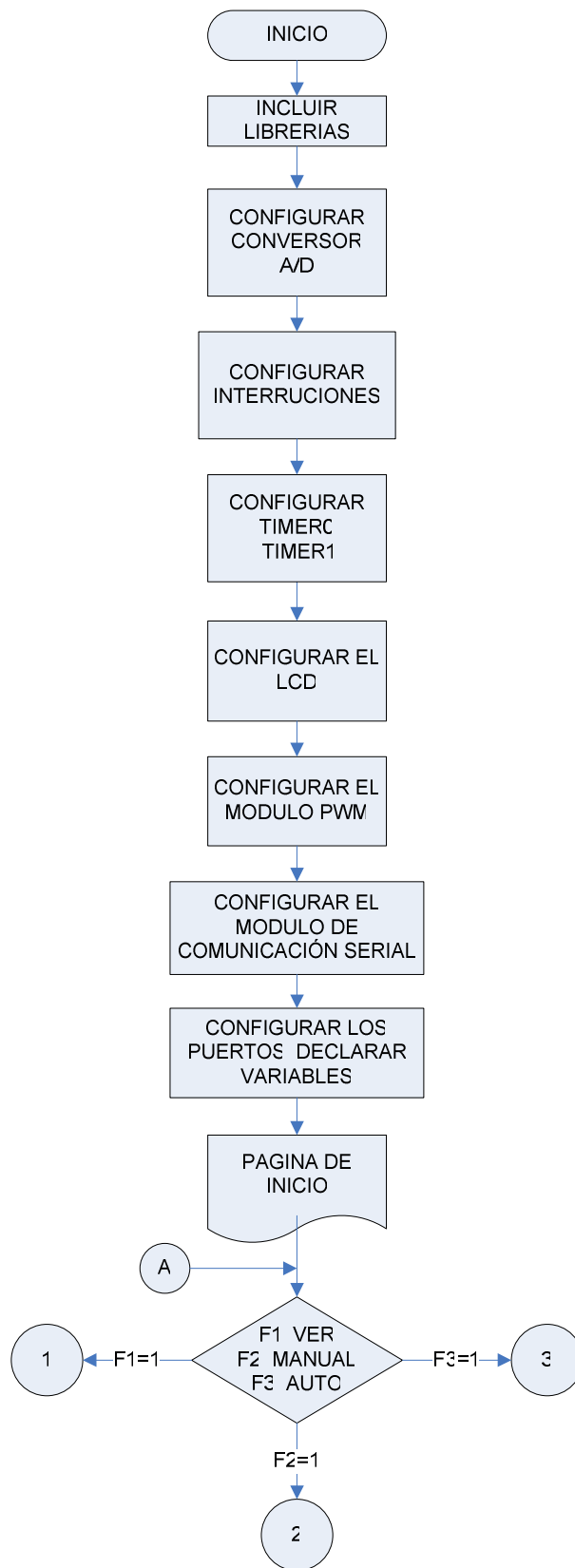


Figura 4—4 Diagrama de flujo del programa principal.

Antes de utilizar el conversor análogo digital del PIC18F452 se debe configurar el registro *ADCON1*, este registro es de 8 bits, el cual se debe habilitar de acuerdo al número de canales de entrada analógica que se requiere para la aplicación, se debe tomar en cuenta también qué voltaje de referencia se va a emplear y activar los bits correspondientes. En el Anexo C se incluye las hojas de datos de los registros del *PIC18452*.

Una vez habilitados los canales análogos, a cada uno se los debe asignar como entrada en el registro TRIS, para ello se pone en 1 el respectivo pin. El resto de pines que no se seleccionaron como entrada análoga se los puede emplear como un pin de E/S de propósito general y también debe ser asignada su función en el registro TRIS como entrada (1) o como salida (0). Se debe tener cuidado de no utilizar como entrada un pin configurado como salida, ya que se puede ocasionar daño irreversible al puerto del microcontrolador.

Una vez configurados los canales que se van a ocupar del conversor A/D, está listo para ser utilizado; para realizar la lectura de un canal análogo específico se debe incluir la librería *ADC_Read* en el lugar de la programación donde se la requiera, la tabla 4-3 se describe esta librería.

Prototipo	Sub function <i>ADC_Read</i> (dim <i>chanel</i> as byte) as word.
Retorna	El valor sin signo con resolución de 10 bits leído del <i>chanel</i> especificado.
Descripción	Inicializa el módulo A/D interno del PIC para trabajar con el reloj interno RC. La fuente de reloj determina el período necesario para efectuar la conversión A/D que es de 4µS para este tipo de reloj.

Tabla 4—3 Librería *ADC_Read*

Para configurar el LCD se debe elegir si los datos se van a transmitir a 4 u 8 bits, en la sección 3.5 se describe las diferencias entre estos dos modos de funcionamiento; como se decidió trabajar con datos de 4 bits, se conecta

físicamente los pines del LCD de acuerdo a la tabla 4-4 donde se indican la librería para la inicialización del LCD.

Prototipo	Sub procedure <i>LCD_Config</i> (dim byref <i>data_port</i> as byte, dim <i>D7</i> , <i>D6</i> , <i>D5</i> , <i>D4</i> as byte, dim byref <i>ctrl_port</i> as byet, dim <i>RS</i> , <i>WR</i> , <i>EN</i> , as byte).
Descripción	Inicializa el puerto de datos y puerto de control del LCD en los pines especificados por el programador.

Tabla 4—4 Librería LCD_Config.

En la tabla 3-7 se indican los bits del puerto B, asignados para controlar el LCD y al pin del microcontrolador al que corresponden.

En la tabla 4-5 se describe el uso de la librería *LCD_Out*, necesaria para escribir caracteres en el LCD.

Prototipo	Sub procedure <i>LCD_Out</i> (dim <i>row</i> , <i>col</i> as byte, dim byref <i>text</i> as char [255])
Requiere	Haber inicializado los pines de datos y control del LCD.
Descripción	Imprime lo escrito en <i>text</i> en el LCD en el lugar especificado por la fila y columna, las variables y literales deben ser convertidas a texto antes de ser imprimidas.

Tabla 4—5 Librería LCD_Out

La obtención del tren de pulsos PWM en mikroBasic se puede obtener por dos métodos, se puede desarrollar una rutina de programación ó se puede utilizar el hardware PWM incluido en el PIC18F452.

Si se desea utilizar los pines del módulo PWM incluido en el PIC se define los parámetros indicados en la tabla 4-6. El PIC18F452 posee dos canales de salida PWM para control, en los bits 1 y 2 del PORTC.

Prototipo	Sub procedure <i>PWM_Init</i> (dim <i>freq</i> as longint)
Requiere	Revisar los módulos PWM disponibles (depende de la familia del PIC) e incluir el número del módulo que se desea ocupar.
Descripción	Inicializa el módulo PWM con una relación de trabajo en 0. el parámetro <i>freq</i> determina la frecuencia del tren de pulsos y depende del PIC utilizado.

Tabla 4—6 Librería PWM_Init

La relación de trabajo o *DUTY* del tren de pulsos se puede cambiar empleando la librería *PWM_Change_Duty*, la tabla 4-7 describe la función de esta librería.

Prototipo	Sub procedure <i>PWM_Change_duty</i> (dim <i>duty_ratio</i> as byte)
Requiere	Haber previamente inicializado como salida los pines del PORTC que son de control PWM.
Descripción	Cambia la relación de trabajo del tren de pulsos PWM, <i>duty_ratio</i> toma valores de 0 a 255, donde 0 es el 0% 127 el 50% y 255 es el 100% de la relación de trabajo.

Tabla 4—7 Librería PWM_Change_Duty

La comunicación serial del PIC18F452 se encuentra disponible en el PORTC y debe ser habilitada empleando la librería *Usart_init* descrita en la tabla 4-8.

Prototipo	Sub procedure <i>Usart_Init</i> (dim <i>baud_rate</i> as longint)
Requiere	De microcontrolador PIC con módulo USART interno disponible.
Descripción	Inicializa el hardware del módulo USART interno del PIC con la velocidad de transmisión de datos <i>baud_rate</i> elegida por el programador. Si se elige una velocidad de transmisión no soportada por el microcontrolador, el compilador reporta un error.

Tabla 4—8 Librería USART_Init

El PIC18F452 tiene disponible la comunicación USART por hardware interno en el bit 6 y bit 7 del PORTC, siendo el transmisor y receptor respectivamente. El formato de comunicación empleado es 8N1 con velocidad de transmisión de 9600 baudios por segundo, el significado de estos parámetros se explicó ampliamente en la sección 2.5 de este documento.

Una vez terminada la configuración de los periféricos empieza el desarrollo del algoritmo, al energizar el módulo aparece en el LCD la página de inicio, en ésta se incluye la identificación del Módulo Automático, tal como se indica en la figura 4-5.

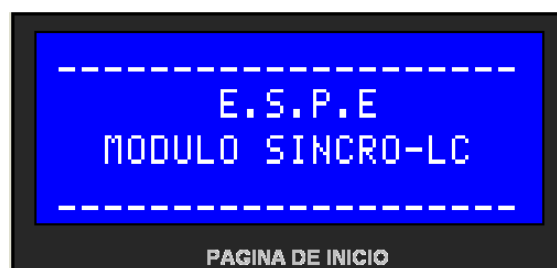


Figura 4—5 Página de inicio.

En la figura 4-6 se describe la página de principal que aparece automáticamente luego de 2 segundos de haber presentado la página de inicio, en esta página se muestra el menú con las opciones para controlar el Módulo de Sincronización Automático.



Figura 4—6 Página principal.

En la página menú se incluyeron el acceso a tres páginas, la primera de visualización de datos (F1), la segunda de control manual del módulo (F2) y la tercera habilita el control automático del mismo (F3).

4.2.2.2 Página de visualización de datos.

Elegida la opción F1 de la página principal, se tiene acceso a la página de visualización de las variables de: voltaje, frecuencia y secuencia; tanto de la red eléctrica como del generador síncrono, en la figura 4-7 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo empleado para adquirir las variables y presentar sus valores.

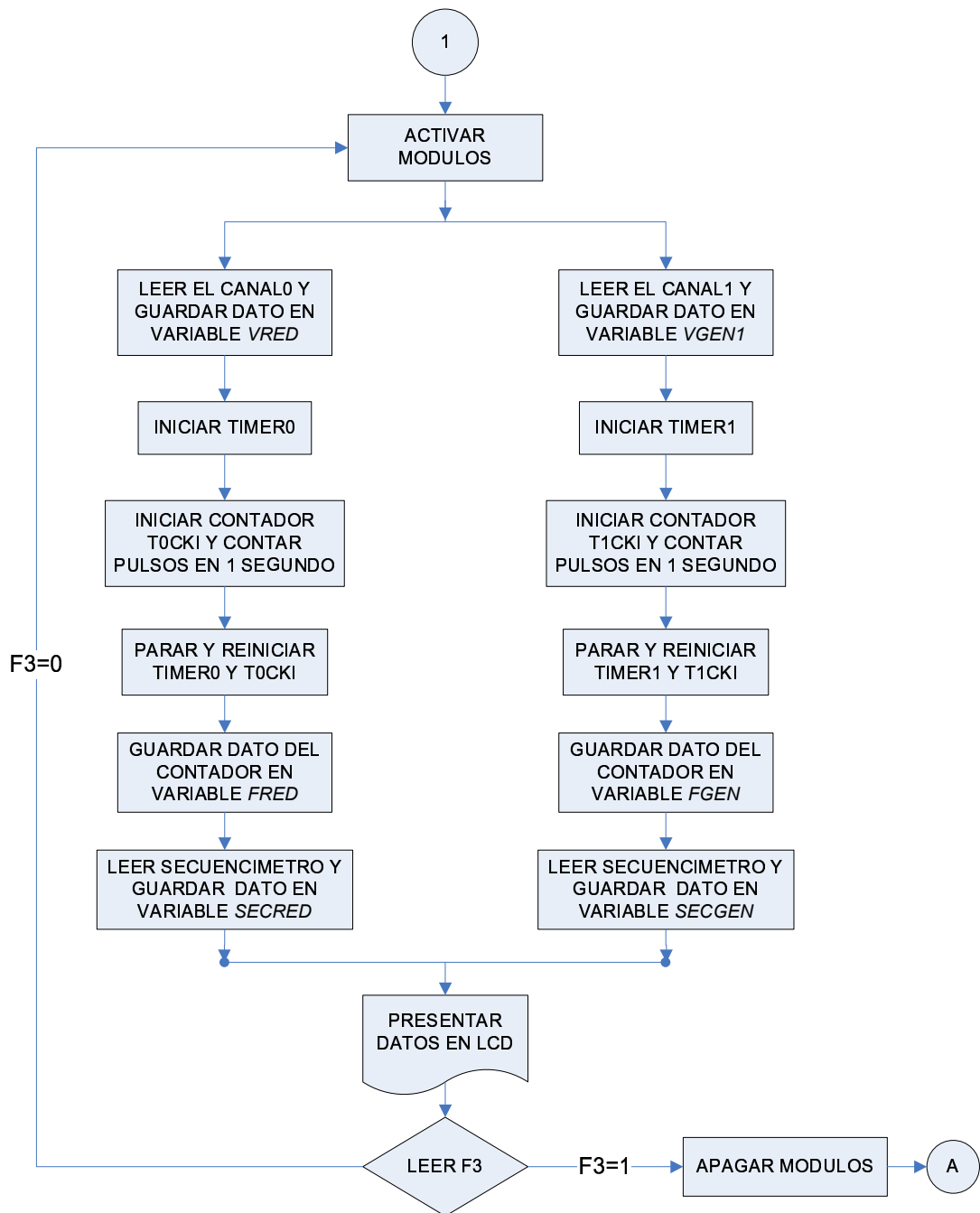


Figura 4—7 Diagrama de flujo para visualización de datos.

En la sección 3.3.3 se explicó la técnica utilizada para la determinación de la secuencia de fases.

El tiempo de ejecución de esta página está definida por el usuario, ya que se ha asignado a la tecla F3 la función de retornar a la página principal, cuando sea pulsada en esta página; inmediatamente después de ser leído el pulso de la tecla F3, se resetean todas las variables para que no den datos erróneos al ser usadas nuevamente.

La figura 4-8 describe la página de visualización de datos, en ella se muestra los parámetros eléctricos medidos en la red eléctrica y el generador sincrónico.

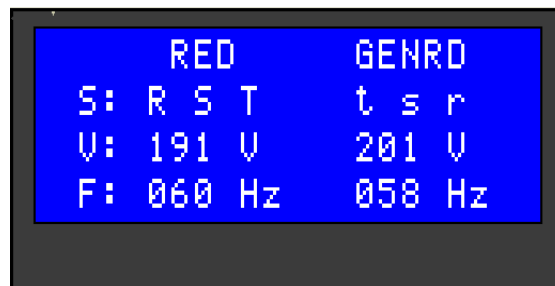


Figura 4—8 Página de visualización de datos.

Los datos que se presentan en la pantalla se actualizan aproximadamente cada dos segundos, debido a que el algoritmo empleado para obtener la frecuencia consiste en contar los ciclos que pasa la onda de voltaje durante un segundo.

4.2.2.3 Página de control Manual.

Para realizar el control manual del módulo de sincronización se emplea la rutina de programación descrita en el diagrama de flujo de la figura 4-9; se tiene acceso a esta página, cuando F2 es pulsado en la página principal.

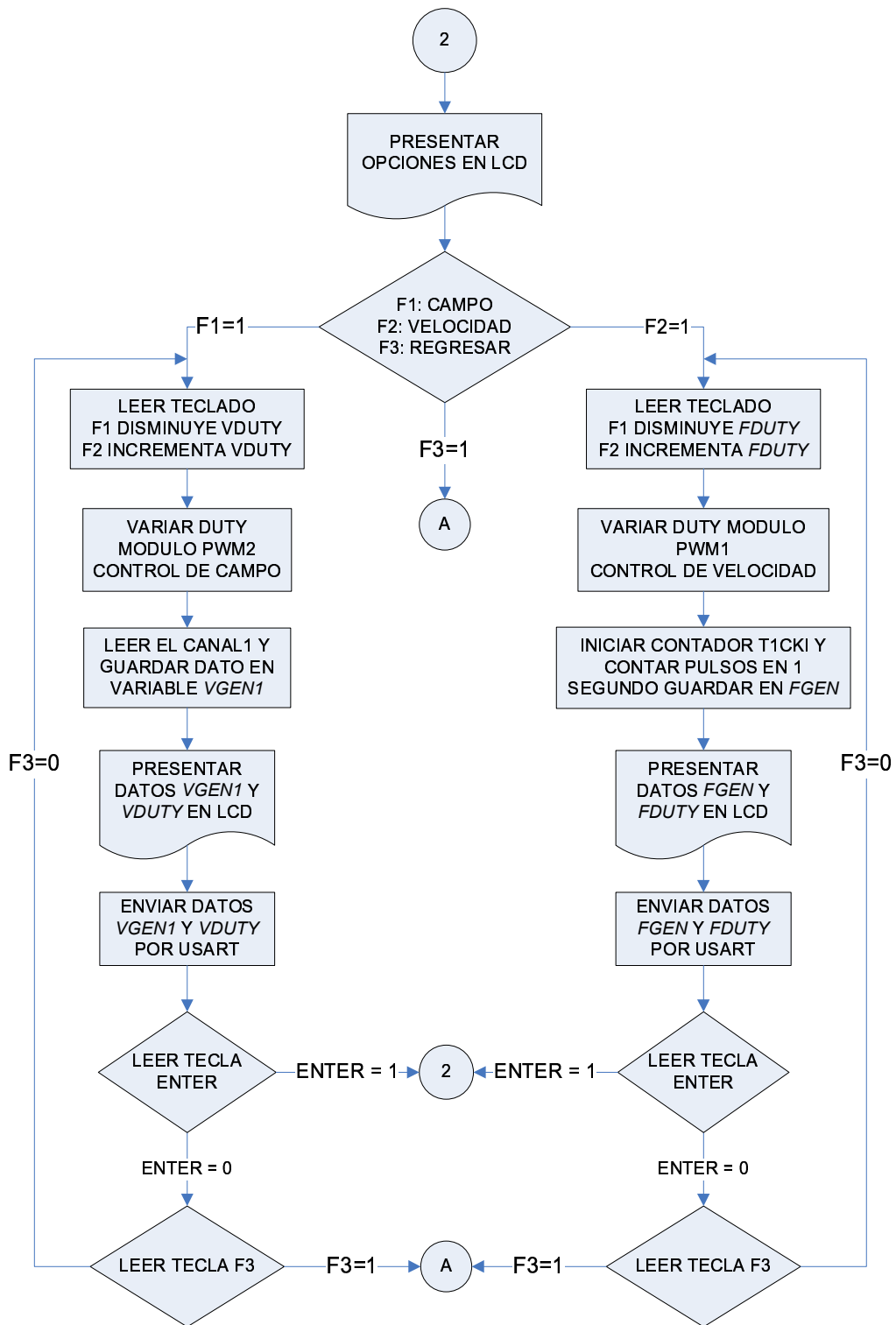


Figura 4—9 Diagrama de flujo para el control manual del módulo.

Las propiedades asignadas a cada tecla se muestran en LCD, tal como lo muestra la figura 4-10. Dentro de la página de control manual del generador, se

tiene acceso al control manual individual del campo generado y de la velocidad de la máquina motriz, así como el retorno a la página principal o página de menú.

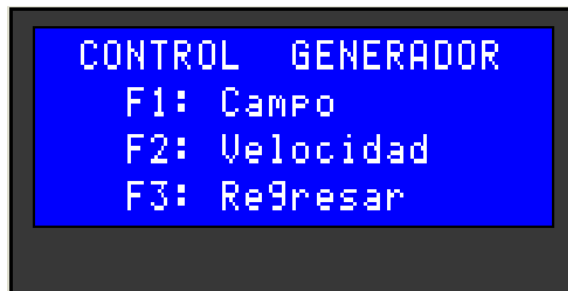


Figura 4—10 Página de opciones de control manual.

Presionada la tecla F1 en la página de control manual del generador, se accede al control del campo generado; en la figura 4-11 se muestra la apariencia de pantalla que aparece en el LCD cuando se requiere esta página.

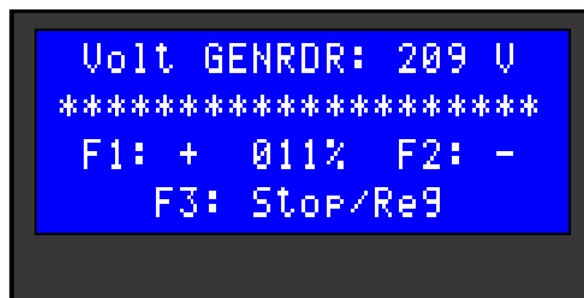


Figura 4—11 Página de control de campo.

En esta página se muestra la variación del voltaje generado que se mide en los bornes U - V del generador, cuando se cambia la relación de trabajo por medio de las teclas F1 y F2, para controlar el voltaje aplicado a la bobina de campo.

Si se desea controlar la velocidad de la máquina motriz, se debe presionar la tecla F2 en la página de control manual mostrada en la figura 4-10, a continuación en la figura 4-12 se muestra la pantalla que aparece en el LCD. Desde esta pantalla se puede controlar la velocidad de la máquina motriz por medio del teclado, hasta obtener la frecuencia de 60 Hz del voltaje generado, que se requiere para la sincronización.

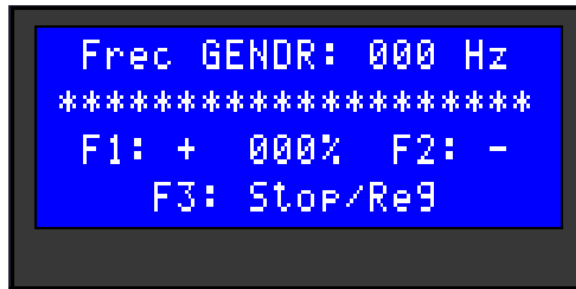


Figura 4—12 Página de control de velocidad.

La tecla ENTER sirve para salir de cualquiera de las dos páginas de control guardando los datos. Esta acción permite retornar a la página de control manual, pero, con las salidas de control de campo y de velocidad fijadas en el valor que el operador los seleccionó; se implementó con esta función a esta tecla, porque para poder medir la frecuencia, es necesario primeramente aplicar cierta cantidad de corriente de campo para que el voltaje sea diferente de cero y tenga señal de frecuencia, se debe regresar entonces a la página manual y elegir el control de velocidad, y ajustar hasta que la frecuencia leída en el generador sea de 60 Hz; una vez seteado este valor, es necesario volver nuevamente a controlar el campo y ajustar el voltaje generado hasta obtener 220 V.

Las teclas F1 y F2 tienen la función de incrementar o disminuir la señal de salida, la tecla F3 tiene la finalidad de regresar a la página de visualización de datos para poder monitorear el estado de las variables en el instante que el operador lo requiera.

Cuando ambos sistemas están sincronizados, resta únicamente cerrar el interruptor para activar el contactor de puesta en paralelo; para ello se toma en cuenta el voltaje diferencial.

En la parte frontal del módulo se implementó un voltímetro constituido por 20 led's de alto brillo de color azul, este indica el voltaje diferencial entre las fases L1 de la Red y U del generador; el voltaje varía entre 0 y 200 Voltios y cuando éste indique el voltaje más cercano a cero se debe cerrar el interruptor para dejar acoplado el generador a la red.

4.2.2.4 Página de control Automático.

Para el Control Automático de la Sincronización se emplea la técnica de Control de Procesos Continuos en Lazo Cerrado. Se entiende como procesos continuos aquellos cuya magnitud a regular varía de forma continua en el tiempo. Esta técnica implica el mantenimiento de las variables del proceso en un valor deseado frente a variaciones externas, generando una señal de control.

La acción de control tomada, se basa en la relación dinámica entre la configuración del dispositivo de salida y su efecto sobre el proceso. En general, el control del proceso puede ser clasificado en dos tipos: lazo abierto y lazo cerrado.

El control de lazo cerrado determina la configuración de los dispositivos de salida, midiendo y evaluando durante el transcurso del proceso. En el control de lazo abierto, no se realizan controles automáticos para ver si es necesaria alguna acción correctiva.⁵³

Elección del tipo de control. Para determinar la mejor acción de control para una aplicación y diseñar el sistema, se debe efectuar el análisis completo del proceso.⁵⁴ En la tabla 4-9 se presenta un resumen los tipos de control y su respectiva descripción.

Tipo de Control	Descripción
ON-OFF	Es el tipo de control más simple y económico, no tiene parámetros que configurar, a parte del <i>setpoint</i> ⁵⁵ de la variable. Se lo emplea generalmente para controlar procesos de evolución lenta como temperatura y nivel. La variable está por encima o por debajo del valor deseado. La salida se enciende o apaga completamente.

⁵³ <http://www.usuario.com/informacion/Apuntes-De-Control-Pid/index.html>

⁵⁴ <http://www.arian.cl/downloads/nt-010.pdf>

⁵⁵ **Setpoint:** El setpoint es el punto de ajuste o valor deseado en el que debe permanecer la variable.

<p>ON-OFF CON BANDA DIFERENCIAL</p>	<p>En este modo de control se genera una acción de control, cuando la medición de la variable cruza ciertos límites superior e inferior definidos por el operador.</p> <p>La salida se enciende o apaga completamente para lograr que el valor medido de la variable se mantenga dentro de los valores de banda diferencial.</p> <p>A diferencia del modo de control anterior con éste se elimina oscilaciones de alta frecuencia que se pueden generar, porque los ciclos ON-OFF son más largos.</p>
<p>PROPORCIONAL (P)</p>	<p>Se lo utiliza en procesos donde el setpoint no es estricto, es decir que puede estar dentro de un rango permisible y en procesos donde las perturbaciones son momentáneas o temporales.</p> <p>El controlador proporcional responde enérgicamente cuando el error es grande, teniendo el efecto de reducir el tiempo de crecimiento del error pero con la desventaja que no lo elimina totalmente, produciendo un error residual.</p> <p>La cantidad de excitación de control proporcional es una relación directa de la cantidad de error en el sistema.</p> <p>Requiere de un valor de offset de excitación para mantener la salida estable cuando el error es igual a 0.</p>
<p>INTEGRAL (I)</p>	<p>La acción integral permite eliminar el error residual producido por perturbaciones perdurables en el sistema. Estas se producen por pérdidas o ganancia de energía, que persisten por un largo período de tiempo.</p> <p>Para la excitación integral, la cantidad de error es integrada con respecto al tiempo, es decir a mayor error y cuanto más dure mayor será la excitación integral.</p>
<p>DERIVATIVO (D)</p>	<p>La acción integral puede causar inestabilidad o exceso de tiempo de repuesta. El control derivativo responde a un cambio en el error y tiene el efecto de aumentar la estabilidad del sistema al disminuir el sobrepico de error, mejorando así la respuesta transitoria.</p> <p>La acción de control derivativa ayuda a obtener una respuesta dinámica más rápida (menor tiempo de respuesta al presentarse el error).</p> <p>Esta acción es apropiada para cuando se presentan cambios bruscos en el sistema.</p> <p>Cuando el error es constante la salida es cero, por lo tanto jamás se lo implementa solo, siempre se lo implementa en conjunto con el control proporcional (PD) o en una combinación PID.</p>

Tabla 4—9 Tipos de control en lazo cerrado.

Control PID. En la figura 4-13 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al control PID y la representación matemática de la señal de control, que es la suma de las tres acciones ya descritas en la tabla 4-7; es decir, un valor proporcional al error, más la constante integral K_i por la integral del error, más la constante derivativa K_d por la derivada del error. Las acciones integral y derivativa no se ajustan generalmente por sus constantes sino por un tiempo integral T_i y un tiempo derivativo T_d que dependen de la constante proporcional (K_p), quedando la expresión matemática que aparece en la zona inferior de la figura 4-13.

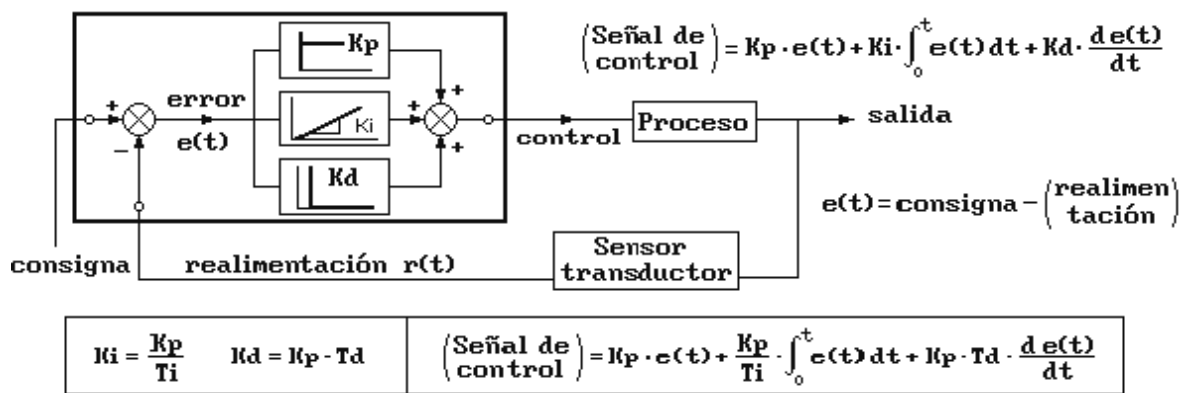


Figura 4—13 Diagrama de bloques y expresión matemática del control PID.

Uso del control PID.⁵⁶ Para el control de posición o dirección, velocidad y aceleración, se utilizan las tres acciones, aunque existen algunas excepciones como el control numérico de máquinas, en las que se aplica el regulador P para el control de la posición de la herramienta y un regulador PI para el control de la velocidad de la misma.

Programación de un PID. Para desarrollar un sistema de control PID existen dos formas, la primera es construir un circuito analógico basado en amplificadores operacionales y la otra es mediante programación del algoritmo PID en un dispositivo digital. En la figura 4-14 se muestra el diagrama de flujo básico para programar el control PID.⁵⁷

⁵⁶ <http://www.arian.cl/downloadds/nt-011.pdf>

⁵⁷ KART J. ASTROM AND HAGGLUND, PID Controllers, Instrument Society of America 1995, ISBN 1-55617-516-7.1

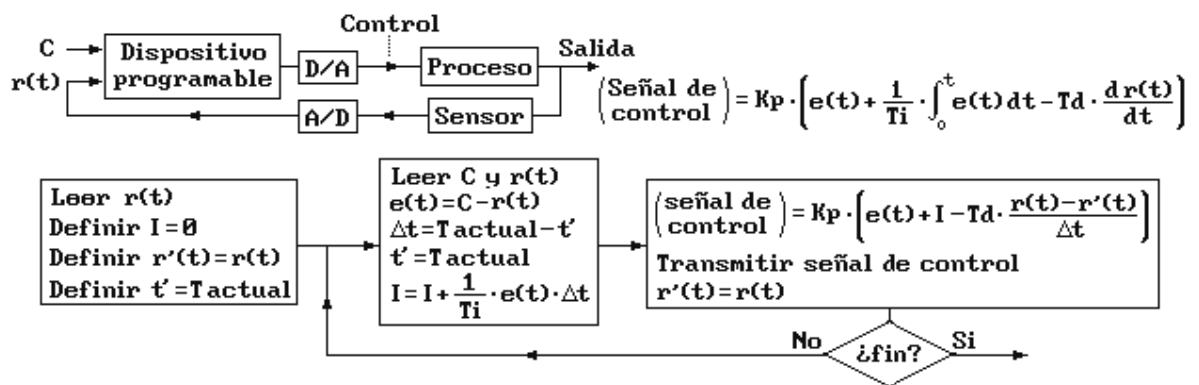


Figura 4—14 Algoritmo para programar el control PID.

El ciclo cerrado consiste en leer las entradas, calcular los datos a enviar a las salidas, y transmitirlos volviendo de nuevo a repetir el ciclo mientras no se cumpla una condición. El tiempo de ciclo, representado en la figura como un incremento de tiempo, debe ser mucho más corto que el tiempo de reacción del proceso, de lo contrario no servirá la regulación.

Aplicación. El control automático de las variables del generador se lo realiza en forma individual, empezando por la frecuencia. Para obtener el setpoint se establece una rutina que realice la lectura automática de los parámetros de la red, tal como lo describe el diagrama de flujo presentado en la figura 4-15.

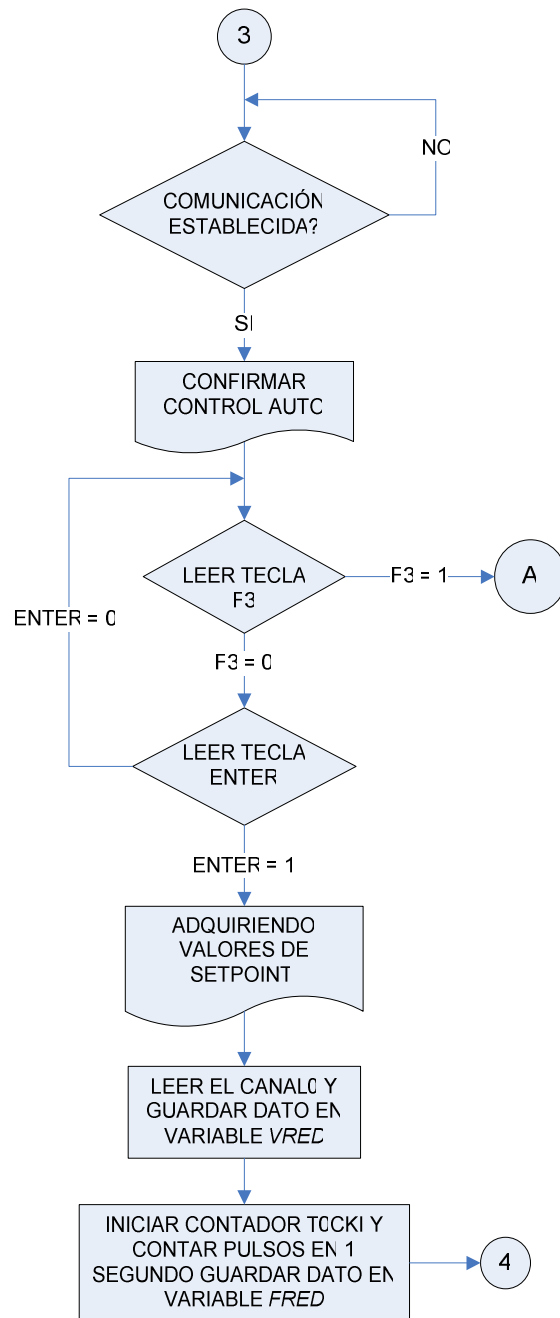


Figura 4—15 Diagrama de flujo para lectura del setpoint de voltaje y frecuencia.

Para acceder a la página de Control Automático se debe presionar la tecla F3 en la página de menú, inmediatamente aparecerá la pantalla mostrada en la figura 4-16.

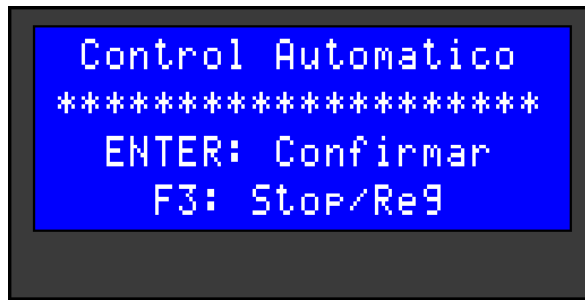


Figura 4—16 Página de control automático.

Dentro de la página de control automático se tienen dos opciones, la primera es la de confirmar la acción seleccionada, la segunda es la de cancelar la operación y retornar a la página principal de menú presionando la tecla F3.

Pulsada la tecla ENTER se inicia la adquisición de valores para el setpoint de voltaje y frecuencia, tal como lo describe la figura 4-17.

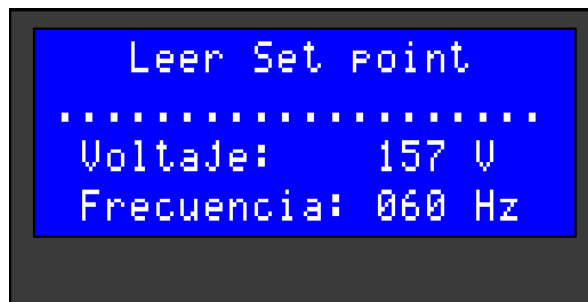


Figura 4—17 Lectura automática del setpoint.

El siguiente paso es determinar automáticamente el valor de offset o excitación de mantenimiento. La excitación de mantenimiento se refiere a la señal de control, necesaria para mantener el setpoint en el valor deseado; una vez alcanzado este valor entrará a trabajar el control PID, para mantener el setpoint cuando se presenten transitorios que hagan variar la salida.

Las figura 4-18 y 4-19 muestran el algoritmo empleado para determinar el offset de frecuencia y voltaje respectivamente.

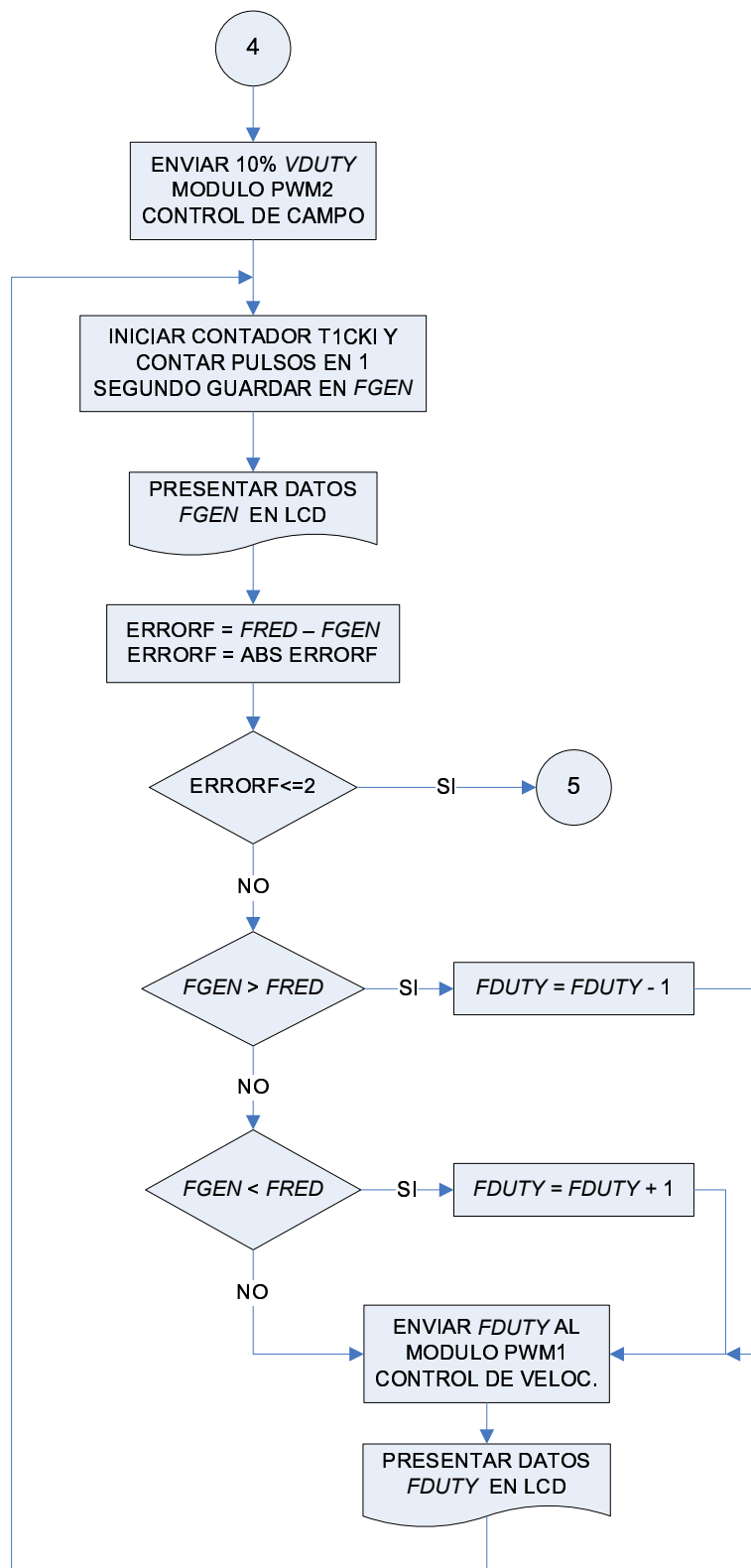


Figura 4—18 Diagrama de flujo para obtener el offset de frecuencia.

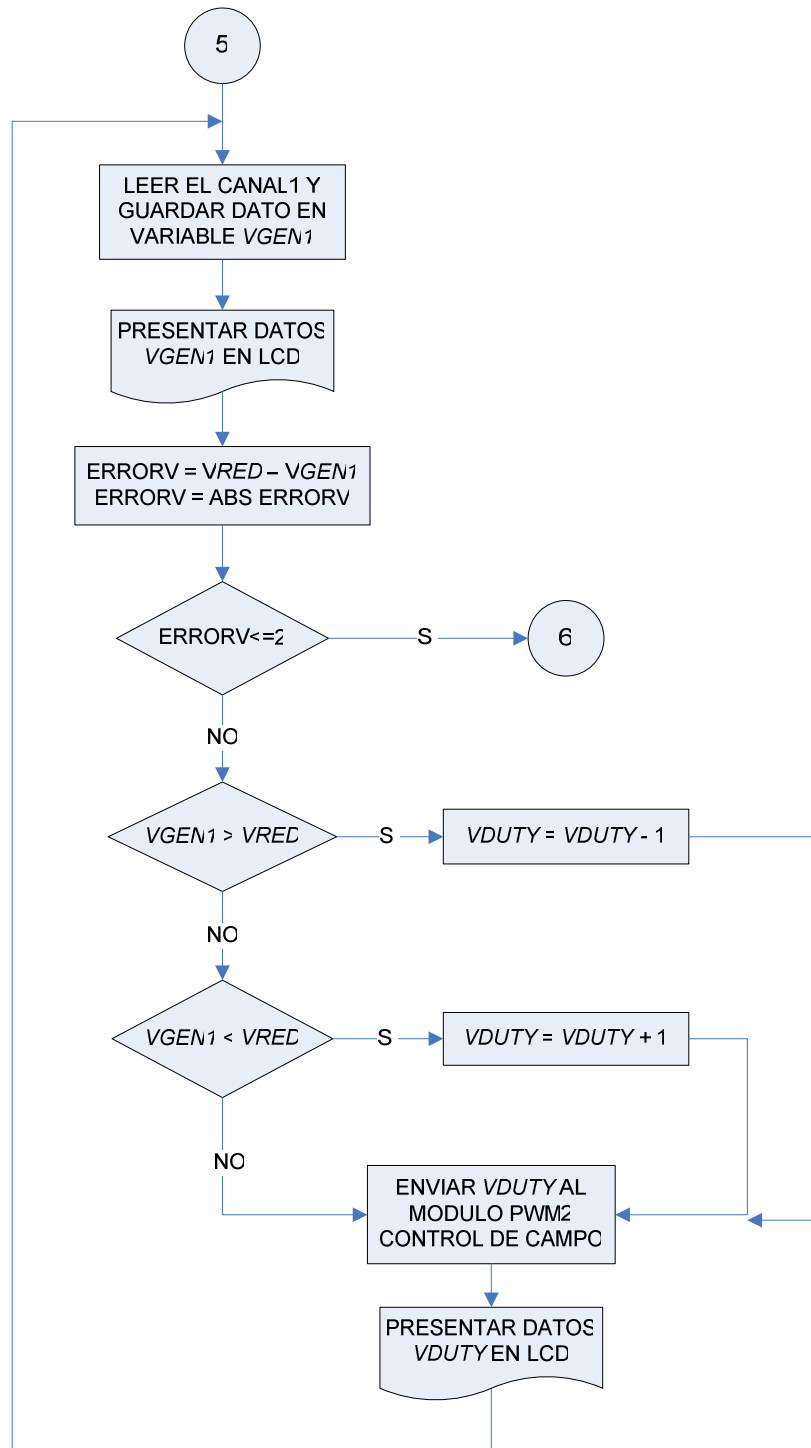


Figura 4—19 Diagrama de flujo para obtener el offset de voltaje.

La figura 4-20 describe la implementación del control PID digital. La banda proporcional de frecuencia es de 1 Hz que equivale al 100% de error de frecuencia, para el voltaje la banda proporcional es de 2 V. Con relación al dato de control 1 Hz equivale a +/- 0.5% y 2V a +/- 0.8%.

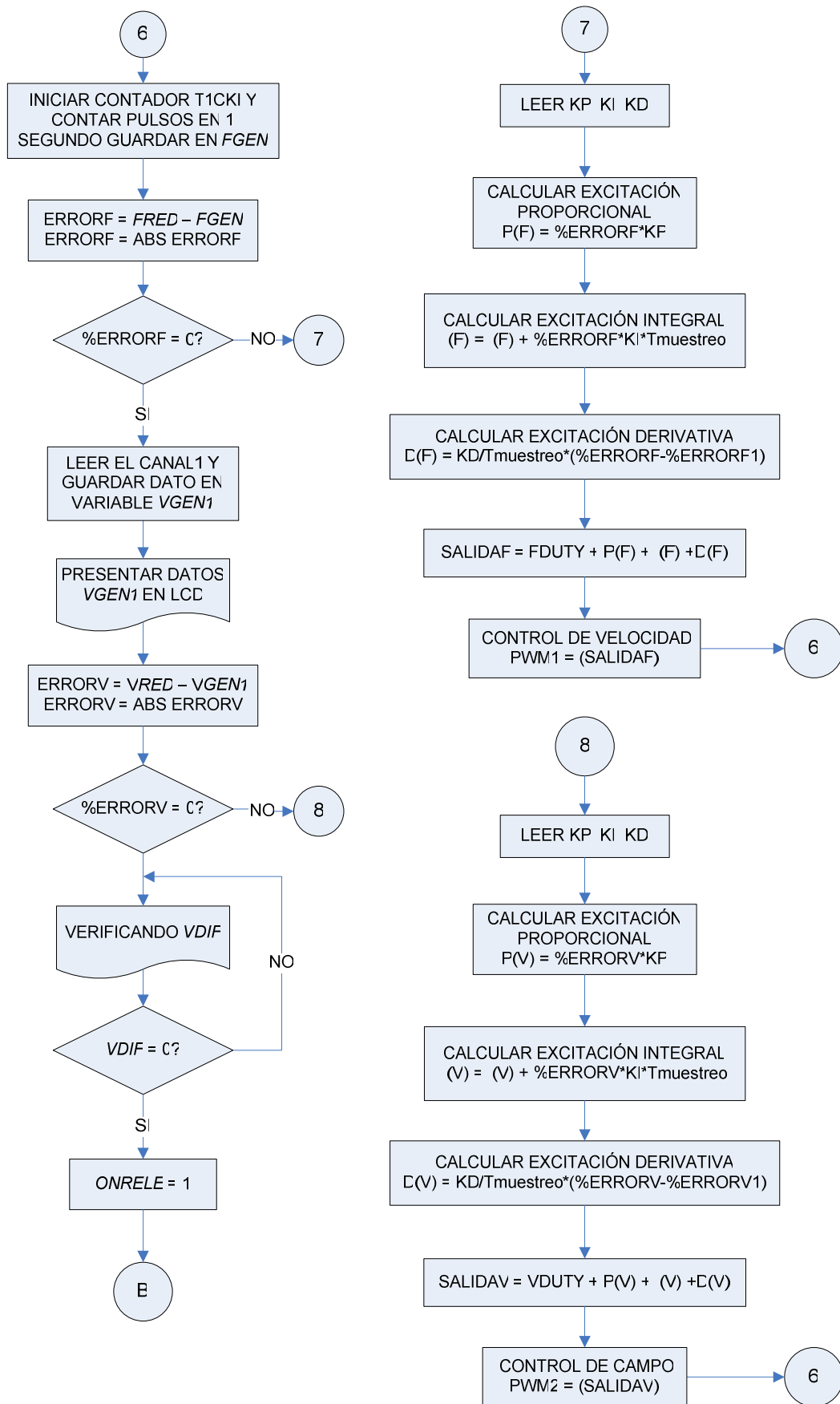


Figura 4—20 Control PID de frecuencia y voltaje.

Una vez sincronizadas la frecuencia y las ondas de voltaje, se salta a una rutina que mide el voltaje diferencial y determina el instante más apropiado para cerrar el interruptor automático, efectuando el acoplamiento del generador.

4.2.2.5 Interfaz para el control de potencia.

La supervisión y control de potencia lo realiza el PC por medio de la comunicación con el microcontrolador, éste obtiene todos los datos necesarios para determinar la potencia trifásica y los envía por el puerto serial al computador, en la figura 4-21 se muestra el algoritmo utilizado.

El control de potencia se logra enviando información desde el PC; el microcontrolador recibe el dato y lo procesa para generar la acción de control solicitada desde el PC. Para calcular la potencia trifásica es necesario adquirir los valores de 2 voltajes de línea, 2 corrientes de fase, y ángulo de desfase entre éstos; es preciso entonces determinar 6 variables: V_{GEN1} , V_{GEN2} , I_{GEN1} , I_{GEN2} , $ANG1$ Y $ANG2$ y enviarlas al PC para su análisis.

El voltaje y corriente son valores analógicos y se los obtiene por medio del conversor A/D del PIC. Para calcular el ángulo de desfase entre voltaje y corriente, se mide el tiempo que tarda en aparecer una onda con respecto a la otra, empleando el Timer3. Una vez obtenido el dato del TMR3 se aplica la expresión 4.1 para obtener el tiempo en segundos.

$$T_{\text{instrucción}} = [(N - 3 - PS) * T_{\text{instrucción}}] * T_{\text{instrucción}} \quad (4.1)$$

Se elige trabajar a 16 bits de resolución, la precarga es el valor inicial que puede ser asignado a la temporización, PS (prescaler) corresponde al divisor de frecuencia seleccionado, $T_{\text{instrucción}}$ es el periodo que demora el microcontrolador en ejecutar una instrucción y se obtiene aplicando la ecuación (4.2)

$$T_{\text{instrucción}} = \frac{4}{f_{\text{osc}}} \quad (4.2)$$

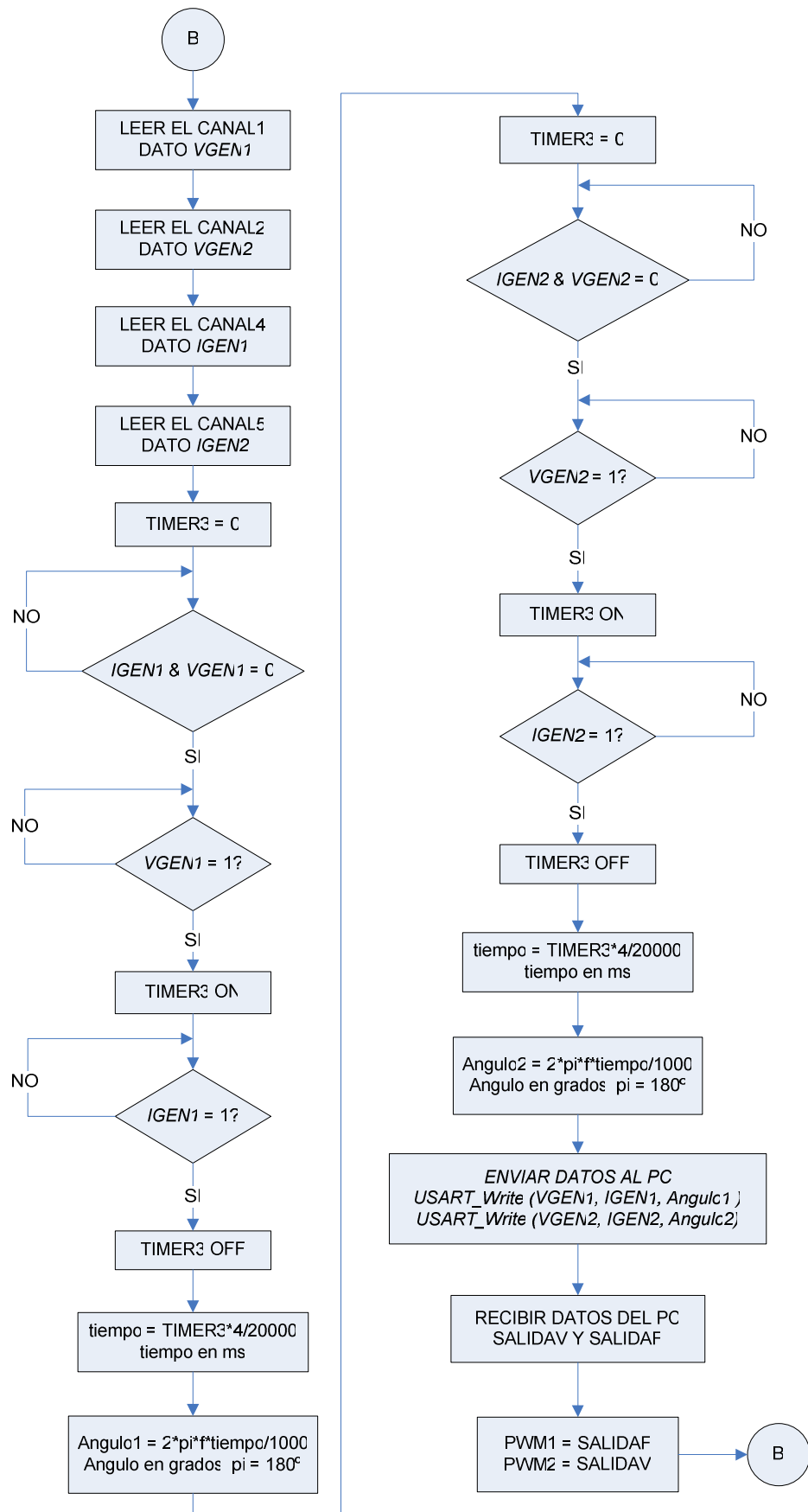


Figura 4—21 Adquisición de datos para el cálculo de potencia.

Para la recepción de datos es necesario aplicar una rutina de comprobación conocida como eco, esta rutina consiste en enviar un dato al PC y reenviarlo al microcontrolador, si el dato recibido es correcto se ejecuta la siguiente línea de programación. Para verificar si existe un dato en el buffer se emplea la instrucción *USART_Data_Ready*, ésta devuelve un 1 si existe algún dato listo, y un 0 si el buffer está vacío.

4.3 Instrumentación Virtual.

El empleo de los ordenadores para el control y supervisión de procesos se ha generalizado en la actualidad.

La instrumentación virtual se define como una ciencia que combina el hardware y software con tecnología computacional estándar, para crear (instrumentos virtuales) soluciones definidas por el usuario.⁵⁸ El hardware constituido por el microcontrolador y el circuito de control y adquisición, tienen la función de adquirir o generar señales desde o hacia el computador; el software se encarga de procesar y presentar en forma ordenada la información recibida.

Instrumento. Se entiende como instrumento a un objeto fabricado, herramienta, aparato, etc., utilizado para realizar una acción de operación o para producir un efecto. Por lo tanto, un instrumento puede tomar diversas formas: desde la forma más simple, constituida por un módulo tradicional; hasta un sistema complejo, basado en computador.

Instrumento virtual. Un instrumento virtual es una aplicación de software, que pretende simular cada uno de los aspectos funcionales del instrumento real, basándose en la adquisición de datos por medio de dispositivos físicos compatibles con el computador. Cuando se ejecuta un programa que representa un instrumento virtual, el operador visualiza en la pantalla el panel que correspondería al instrumento físico permitiendo su control y supervisión.

⁵⁸ J. F. ACOSTA, Instrumentación Virtual, Espe-Latacunga, archivo 2004.

4.3.1 Introducción LabView 7.1.

La palabra LabView esta formada por las iniciales de **L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench. Es un entorno gráfico orientado al desarrollo de aplicaciones en el campo de la instrumentación, desde la adquisición de datos hasta el control remoto de instrumentos. El entorno dispone de librerías matemáticas, para el análisis de datos y de los drivers de control de varios instrumentos.

Los programas de Labview se denominan instrumentos virtuales o **VI**. Estos VI son equivalentes a las funciones de C o a los procedimientos de Pascal. Un VI consta de dos partes bien diferenciadas, el Panel Frontal (Front Panel) y el Diagrama de Bloques (Block Diagram). El panel frontal es la interface del programa con el usuario, en él están representadas todas las entradas y salidas del programa. Por analogía a un instrumento real, las entradas del panel frontal se llaman controles y las salidas indicadores. El diagrama de bloques es el código de programación escrito en lenguaje gráfico. Los distintos componentes del diagrama de bloques son los nodos del programa. Los componentes están interconectados unos con otros. Estas interconexiones definen el flujo de datos en el diagrama de bloques.

4.3.2 Programación con LabView.

Para empezar un programa en Labview, en la ventana que aparece cuando se ejecuta el programa se debe seleccionar la opción New VI, aparecerán entonces dos ventanas vacías, una correspondiente al panel frontal y una correspondiente al diagrama de bloques.

Al situarse sobre el panel de control, deben aparecer dos paletas flotantes, una paleta de herramientas que sirve para editar, modificar y depurar VI's y la paleta de controles que sirve para crear el panel frontal; al situarse en el diagrama de bloques aparece en cambio, la paleta de funciones. Si alguna de estas paletas no es visible se debe activar *show Tools palette*, *show Controls palette* o *show*

Functions palette de la opción *window* de la barra de menú superior. En la figura 4-22 se muestra la apariencia de las tres paletas.

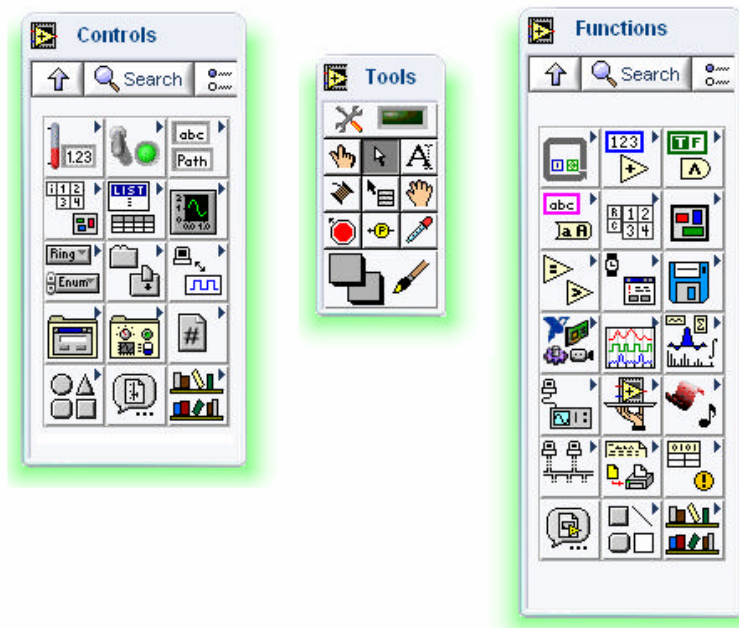


Figura 4—22 Paleta de herramientas, controles y funciones.

Con el entorno gráfico de programación de LabVIEW se comienza a programar a partir del *panel frontal*. En primer lugar se definirán y seleccionarán de la *paleta de controles* todos los *controles* (entradas que dará el usuario) e *indicadores* (salidas que presentará en pantalla el VI), que se emplearán para introducir los datos por parte del usuario y presentar en pantalla los resultados.

Una vez colocados en la ventana correspondiente al *panel frontal* todos los objetos necesarios, se debe pasar a la ventana *Block Diagram* (menú *Windows > Show Block Diagram*), que es donde se realiza la programación propiamente dicha (*diagrama de bloques*). Al abrir esta ventana, en ella se encuentran los terminales correspondientes a los objetos situados en el *panel frontal*, dispuestos automáticamente por LabVIEW.

En el *Block Diagram*, se deben ir situando además las *funciones*, *estructuras*, etc., que se requieran para el desarrollo del programa, las cuales se unen a los terminales mediante cables. Para facilitar la tarea de conexión de todos los

terminales, en el menú “*Help*” puede elegirse la opción “*Show Help*”, con lo que al colocar el cursor del ratón sobre un elemento aparece una ventana con información relativa a éste (parámetros de entrada y salida). Además, si se tiene seleccionado el cursor de cableado, al situar éste sobre un elemento se muestran los terminales de forma intermitente.

4.3.3 Diseño del Software de monitoreo y control.

La aplicación creada en LabView es la encargada de supervisar el sistema y realizar el control de potencia, cuando se selecciona la opción de control automático del Módulo.

La primera acción que realiza el programa es configurar el módulo VISA, al formato 8N1, 9600 baudios de velocidad, con el puerto COM1 habilitado, tal como se describe en la figura 4-23. Se recomienda que esta acción se la realice una sola vez en el transcurso del programa.

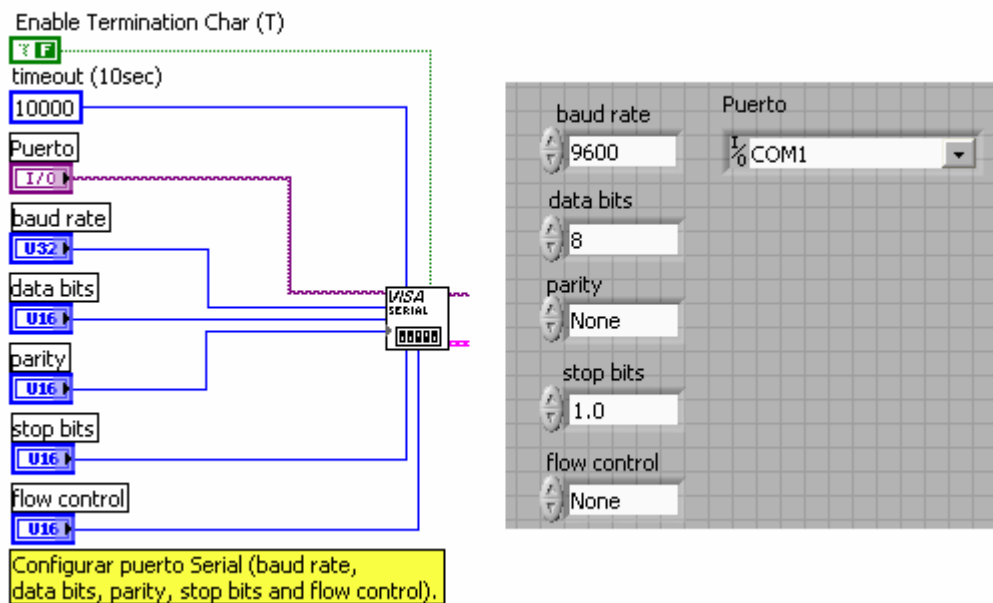


Figura 4—23 Configuración del módulo VISA.

Los terminales del módulo *VISA SERIAL* deben ir conectados al resto de módulos: lectura, escritura y cierre.

4.3.3.1 Monitoreo y supervisión de datos.

La cadena de datos que se envió desde el módulo de Sincronización esta formada por 43 caracteres, estos datos llegan al *buffer* del puerto serial; para leer los datos se emplea el módulo **Vi Read**, descrito en la sección 2.6.2. En la figura 4-24 se muestra el diagrama de bloques empleado para realizar el proceso de lectura del buffer, administración y presentación de datos.

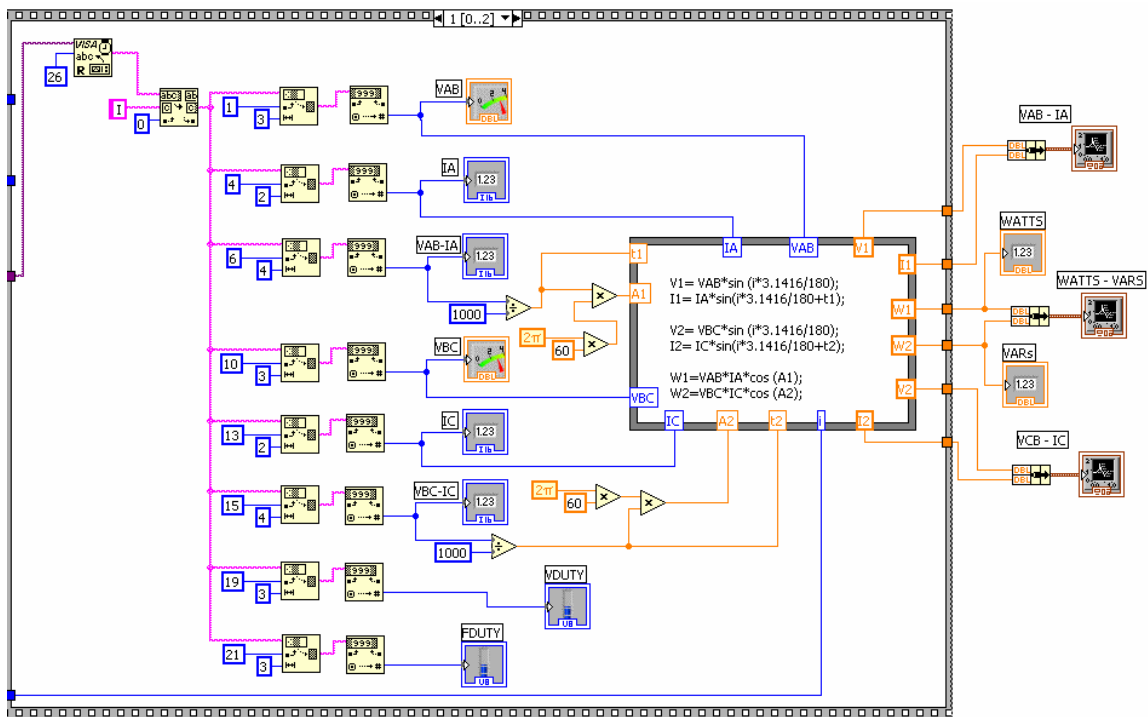


Figura 4—24 Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos

En la cadena de caracteres que llega al buffer se busca los identificadores y se divide la cadena a partir de cada identificador, la separación de datos da como resultado 8 cadenas de datos, luego se debe realizar la conversión de *cadena decimal a número decimal*; realizada la conversión, los datos están listos para ser empleados en las ecuaciones matemáticas necesarias para obtener la potencia activa y reactiva.

Para determinar la potencia de un sistema trifásico se empleó el *método de los dos vatímetros*, este método se emplea para sistemas trifásicos sin neutro, para ello se deben conectar dos vatímetros tal como se muestra en la figura 4-25.

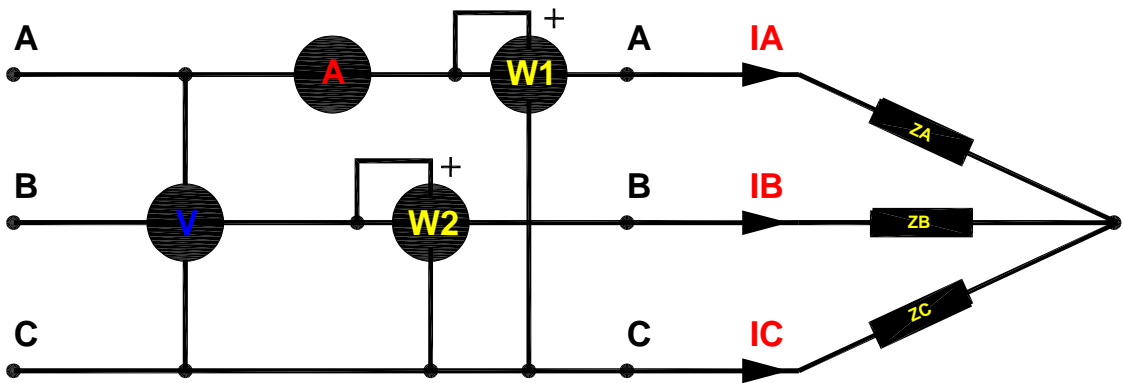


Figura 4—25 Medición de potencia trifásica con dos vatímetros.

Una vez adquiridos estos datos se realiza los cálculos mediante software en LabView para determinar el flujo de potencia. Aplicando las expresiones 4.3 y 4.4 se puede calcular la medida de los vatímetros 1 y 2 respectivamente.

$$W1 = V_B * I_A * \cos \angle_{I_A}^{V_B} \quad (4.3)$$

$$W2 = V_B * I_C * \cos \angle_{I_C}^{V_B} \quad (4.4)$$

El voltaje de línea se encuentra desfasado 30° con respecto al voltaje de fase, se debe tomar en cuenta este valor al momento de obtener los ángulos en el programa creado en LabView, en la figura 4-26 se muestra el diagrama vectorial de los voltajes de línea y fase.

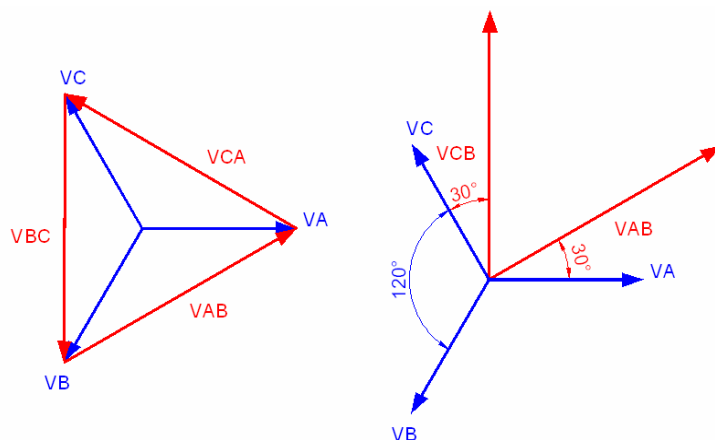


Figura 4—26 Desfase entre voltaje de línea y voltaje de fase.

Para calcular la potencia activa trifásica P se emplea la expresión 4.4, una vez determinada ésta, se calcula la potencia reactiva trifásica Q aplicando la expresión 4.5.

$$P = W1 + W2 \quad (4.4)$$

$$Q = \sqrt{3}(W1 - W2) \quad (4.5)$$

Los datos son presentados en el panel frontal, tal como se indica en la figura 4-27. En éste se muestran numérica y gráficamente todos los datos adquiridos del Generador, así como el acceso a los controles de potencia activa y reactiva.

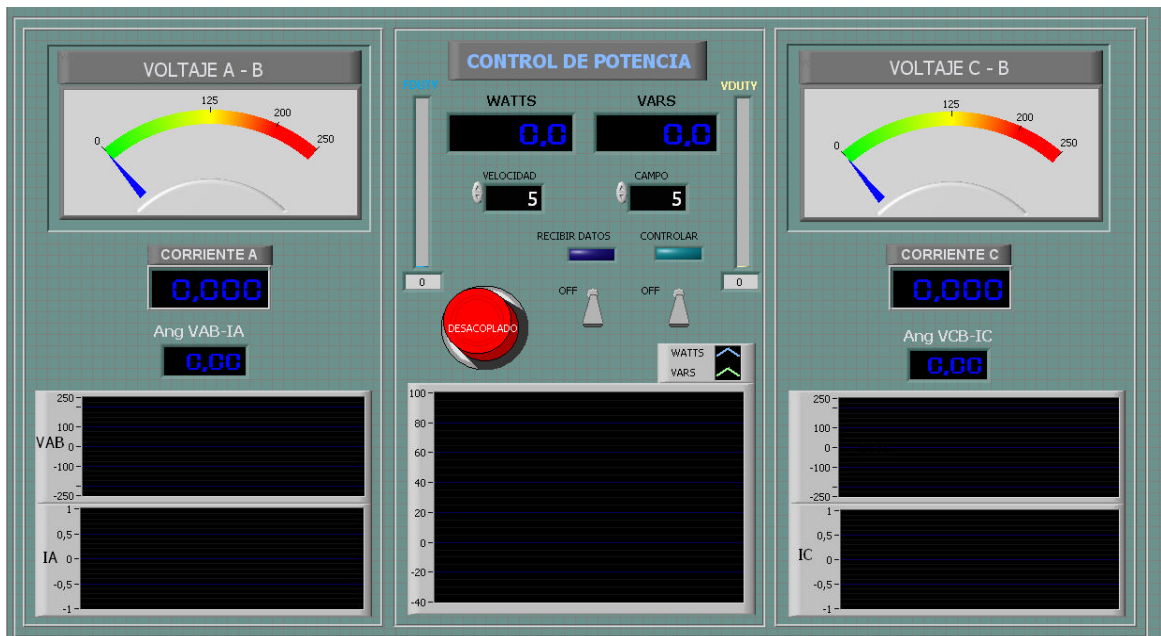


Figura 4—27 Panel frontal para la supervisión y control de potencia.

En la interfaz gráfica se incluyen los botones de control del módulo, situados en el centro de la aplicación.

4.3.3.2 Control virtual del módulo.

Para poder controlar el módulo se deben enviar datos desde la aplicación de LabView hacia el microcontrolador, los datos se envían en forma de string,

usando el módulo **VI Write** de VISA. Desde la aplicación se envía los datos para variar el campo generado, la velocidad de la máquina motriz y el desacople del generador.

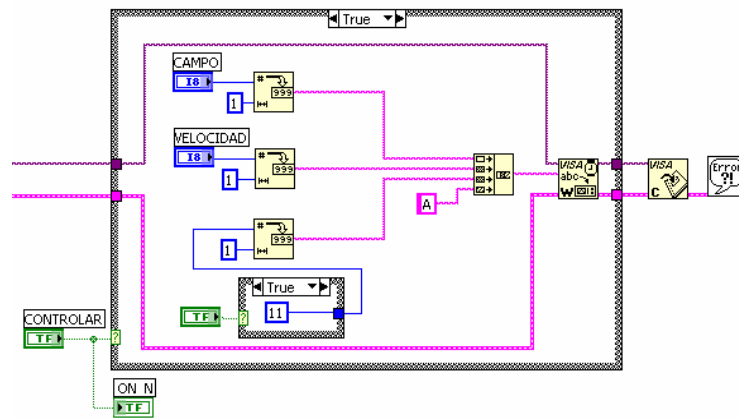


Figura 4—28 Transmisión de datos para control.

Los datos deben ser convertidos de valor numérico a string, también se debe incluir un carácter alfabético que será el identificador. A continuación se concatenan todos los datos en una sola cadena para poder enviarlos al módulo Visa de escritura, en la figura 4-28 se muestra el diagrama de bloques creado para controlar el módulo desde el PC.

CAPITULO V

5 Implementación y pruebas.

5.1 Introducción.

Antes de la fabricación del circuito impreso final, se implementaron circuitos de prueba en *protoboard* con el fin de comprobar si la selección de componentes y el diseño del sistema electrónico son correctos.

5.2 Circuitos de prueba.

Cada uno de los circuitos diseñados, fueron armados y probados individualmente por etapas. Conforme se añadían elementos y se realizaban las pruebas respectivas, el funcionamiento en conjunto desestabilizaba el sistema.

Debido a los problemas de estabilidad presentados, a la cantidad y tamaño de los componentes de los sistemas de entrada, control y salida; se decide diseñar 4 tarjetas para adquirir, controlar y generar datos; éstas se las designó como: tarjeta de entradas, tarjeta de salidas, tarjeta de control y tarjeta de voltaje diferencial. Las mismas que se implementaron y probaron individualmente por etapas.

5.2.1 Pruebas de la Tarjeta de Entradas.

En la tarjeta de entradas se incluye los circuitos encargados de sensar y acondicionar las señales de: secuencia, frecuencia y ángulo de fase (voltaje diferencial); para la red eléctrica y para el generador.

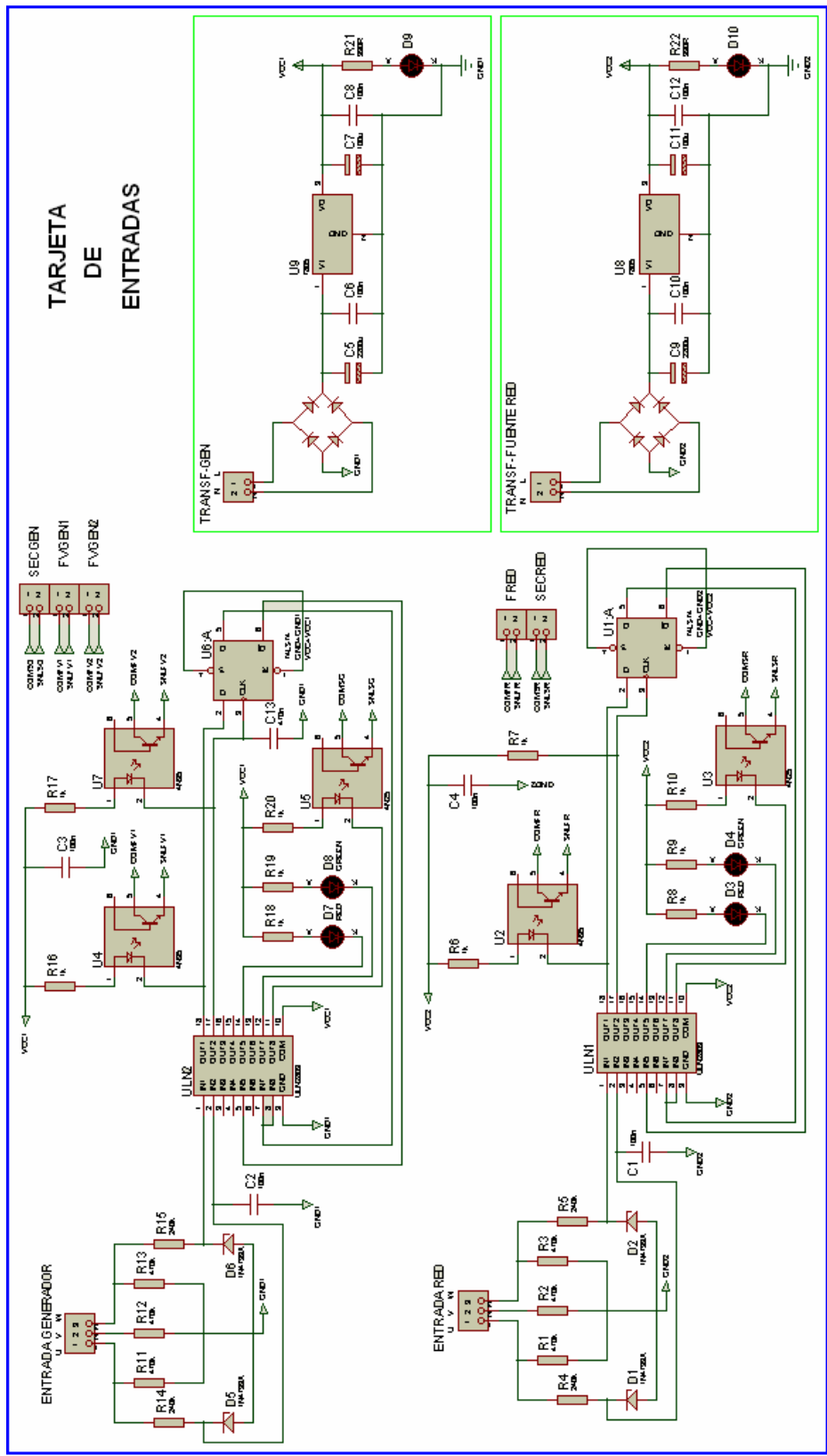


Figura 5—1 Diagrama esquemático de la tarjeta de entradas.

Para diseñar la tarjeta de entradas se prueba el funcionamiento del secuencímetro y el acondicionamiento de señal para medir la frecuencia, a éste se debe conectar las tres fases de la red eléctrica y las tres fases del generador sincrónico; a la salida se tienen los datos digitales de *SECRED*, *SECGEN*, *FRED*, *FVGEN1* *FVGEN2*, en la figura 5-1 se muestra el diagrama esquemático de la tarjeta de entradas.

El funcionamiento en conjunto de estos circuitos produjo ruido eléctrico, que generaba datos erróneos; para dar solución a este problema se utilizó fuentes independientes y se añadió capacitores cerámicos de 100nF a la entrada del ULN2803. En la figura 5-2 se muestra el circuito de prueba de la medición de frecuencia y secuencia de la red eléctrica, el led rojo encendido indica que la secuencia de fases es negativa.

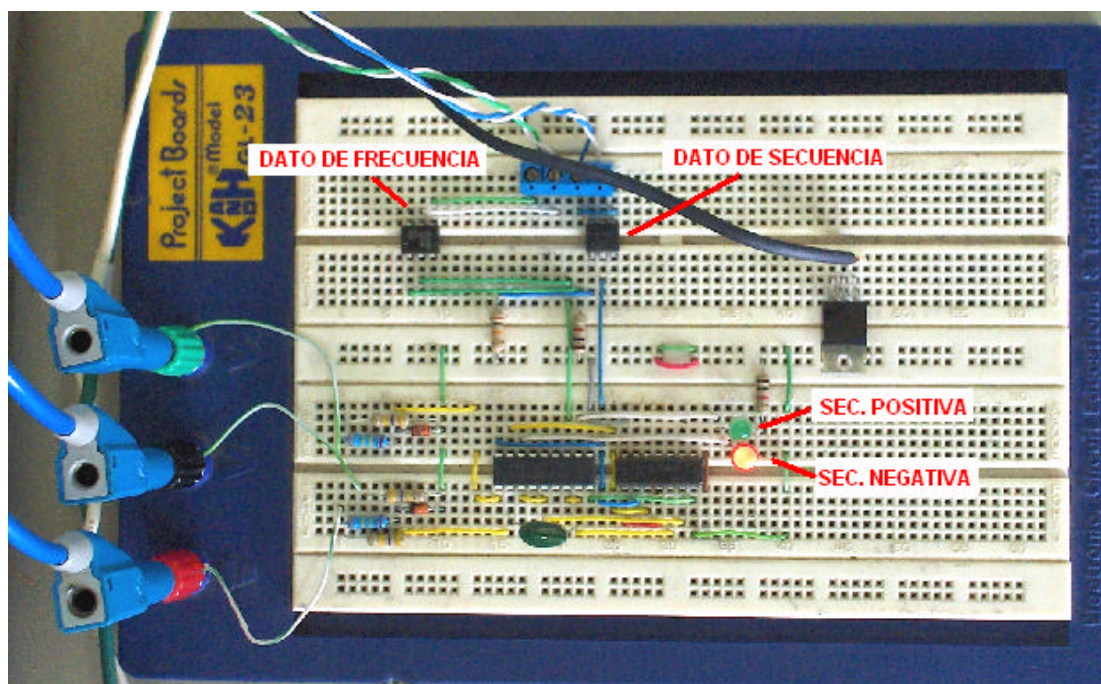


Figura 5—2 Secuencia de fases y frecuencia de la Red Eléctrica.

En la figura 5-3 se muestra el circuito armado para realizar las pruebas de medición de secuencia, frecuencia y ángulo de desfase del voltaje generado. El led rojo encendido indica que la secuencia de fases del generador es positiva, cada uno de estos datos se envían al microcontrolador para que los analice.

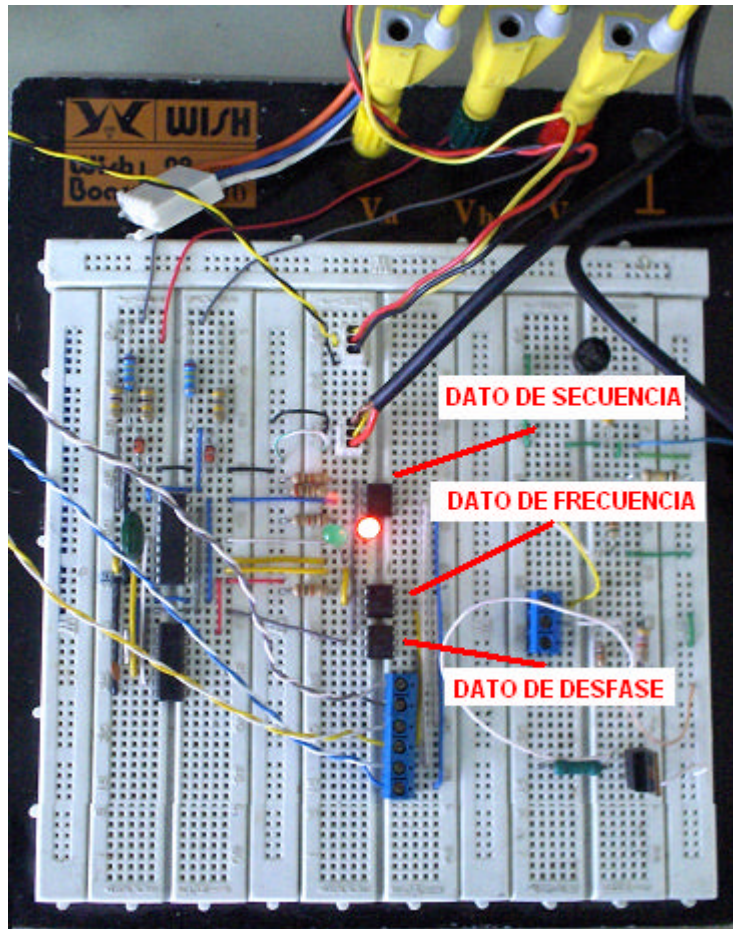


Figura 5—3 Secuencia de fases, frecuencia y desfase del generador.

En la medición de frecuencia, se proporcionaban datos erróneos por parte del microcontrolador, este error era producido por interferencias en la onda de la señal generada por la tarjeta de prueba, en la parte inferior de la figura 5-4 se muestra el error producido.

Para solucionar este problema se conectó un capacitor no polarizado *multicapa*, este tipo de capacitor es más efectivo para filtrar interferencias, en comparación con el capacitor cerámico común.⁵⁹ Al conectar el capacitor la señal resultante es la que se indica en la parte superior de la figura 5-4, y es la señal que ingresa al microcontrolador.

⁵⁹ <http://picmania.garcia-cuervo.com/Recursos.htm>

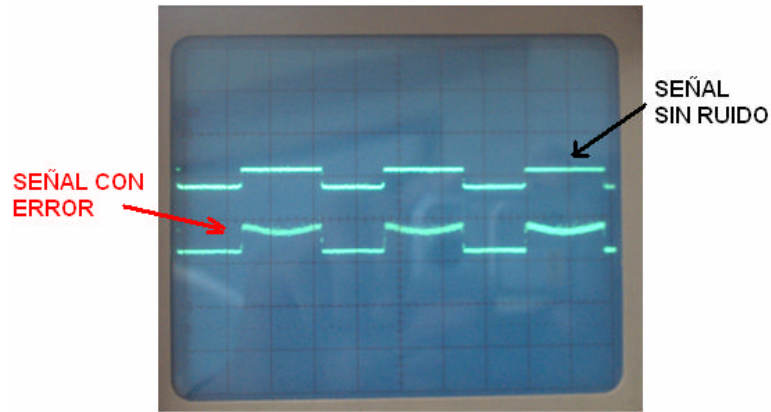


Figura 5—4 Señal acondicionada para la medición de frecuencia.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de los circuitos de prueba de la tarjeta de entradas, se procede a diseñar el circuito impreso de la misma, éste se implementó en una placa de baquelita de 20 x 10 cm, el screen de la disposición de los elementos y de las pistas, impreso en la tarjeta se muestra en el Anexo D.

5.2.2 Pruebas de la Tarjeta de Salidas.

Para la implementación de la tarjeta de salidas, se decidió utilizar una sola placa, donde se incluye el control de campo del generador, nombrado con la variable V_{duty} ; y el control de velocidad del motor primario, nombrado con la variable F_{duty} , en la figura 5-5 se presenta el esquemático de dicha tarjeta.

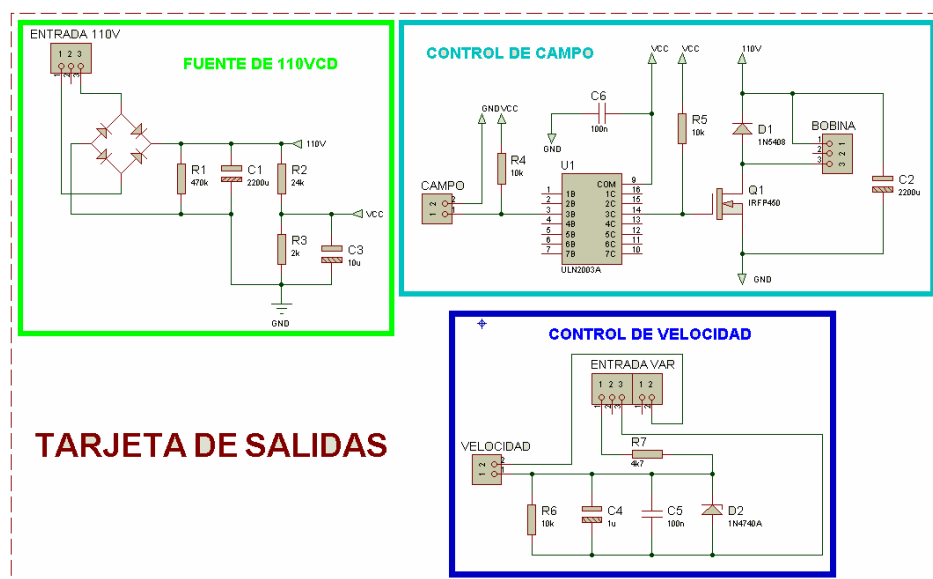


Figura 5—5 Diagrama esquemático de la tarjeta de salidas.

En la figura 5-6 se muestra el circuito de prueba armado, para el control de campo magnético del generador. La fuente de 110 Vdc se obtiene empleando un transformador reductor que se conecta a la fuente de AC, y sus respectivos elementos de rectificación y filtraje.

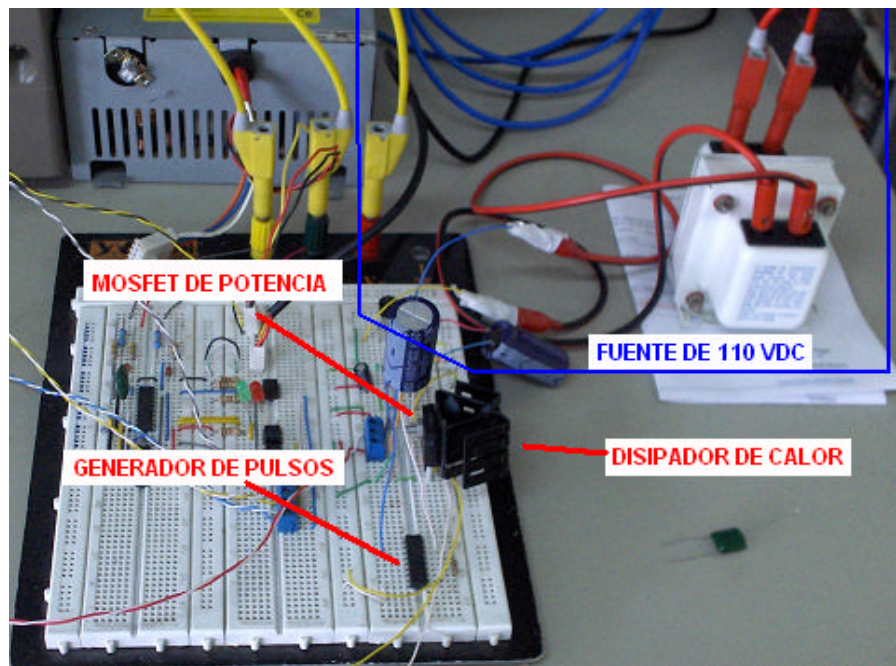


Figura 5—6 Acondicionamiento de señal para el control de campo

La señal de control del variador de frecuencia, es de 0 a 10V que se obtiene, a partir de los pulsos de control proporcionados por el microcontrolador. La señal se envía a la tarjeta de control por medio de un opto-acoplador. En la figura 5-7 se presenta el circuito de prueba del acondicionamiento para el control de velocidad.

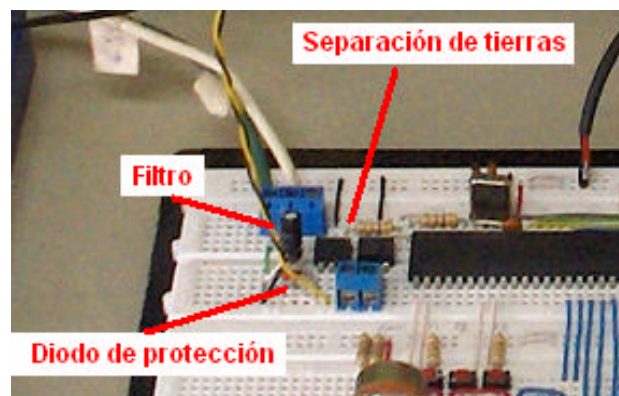


Figura 5—7 Acondicionamiento para el control de velocidad.

Con las pruebas realizadas se determinó que el conjunto de circuitos funcionan correctamente, el circuito impreso diseñado y la distribución de los elementos para la tarjeta de salidas se indican en el Anexo D.

5.2.3 Pruebas de la Tarjeta de Control.

La tarjeta de control es la encargada de recibir los datos, analizarlos y en base a ello generar las señales de control. El núcleo de la tarjeta de control es el microcontrolador PIC18F452, al mismo que llega, a más de las entradas de los sensores; las entradas del teclado, el bus de datos para el manejo del LCD y el protocolo de comunicación RS-232.

Todas las señales de entrada y salida de la tarjeta están aisladas eléctricamente con opto-acopladores y transformadores, la tarjeta se alimenta con una fuente independiente de 5VDC; en la figura 5-8 se incluye el diagrama esquemático de la tarjeta de control.

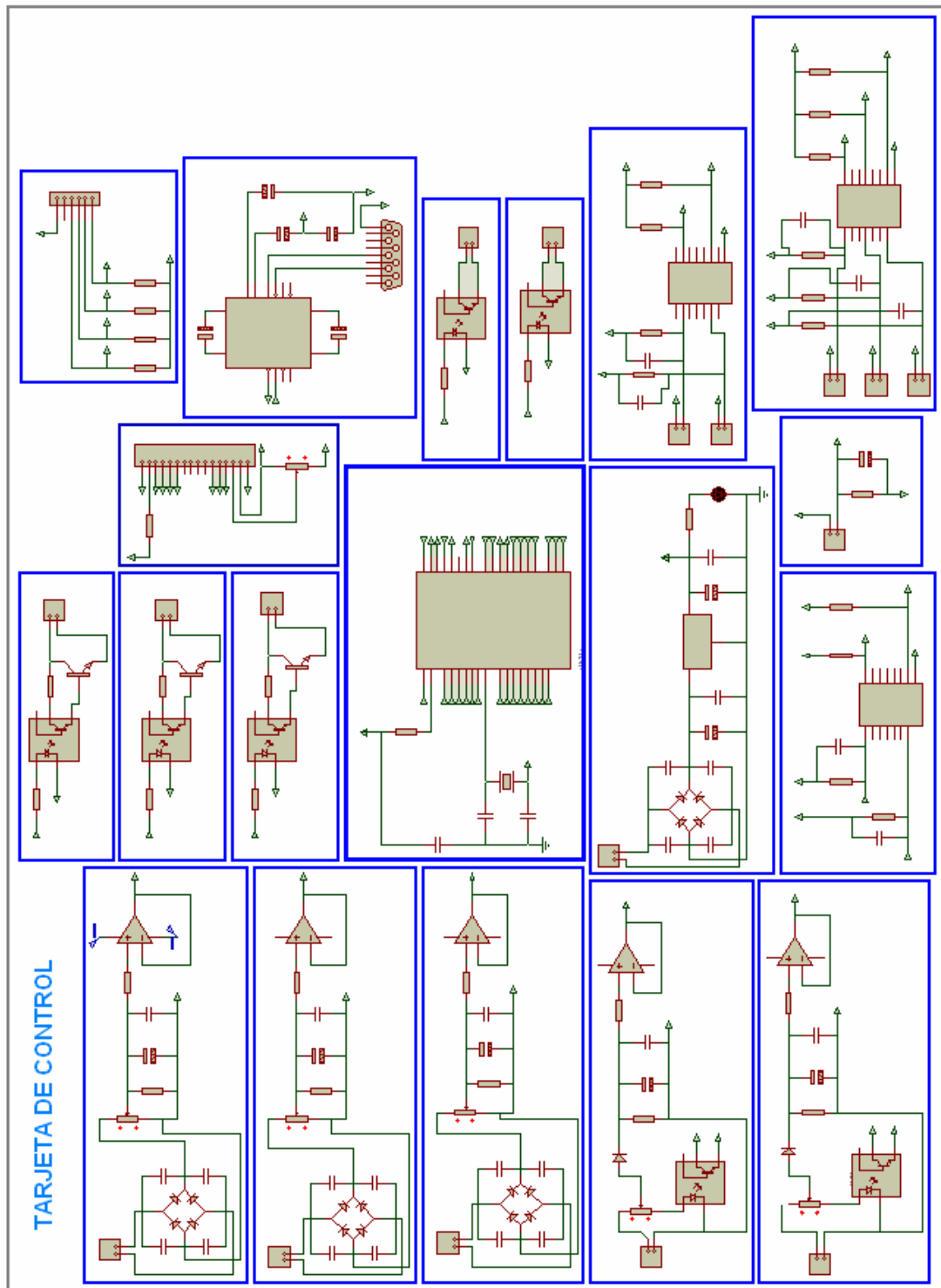


Figura 5—8 Diagrama esquemático de la tarjeta de control.

En la figura 5-9 se muestra el circuito de prueba, implementado para realizar las pruebas de funcionamiento de esta tarjeta.

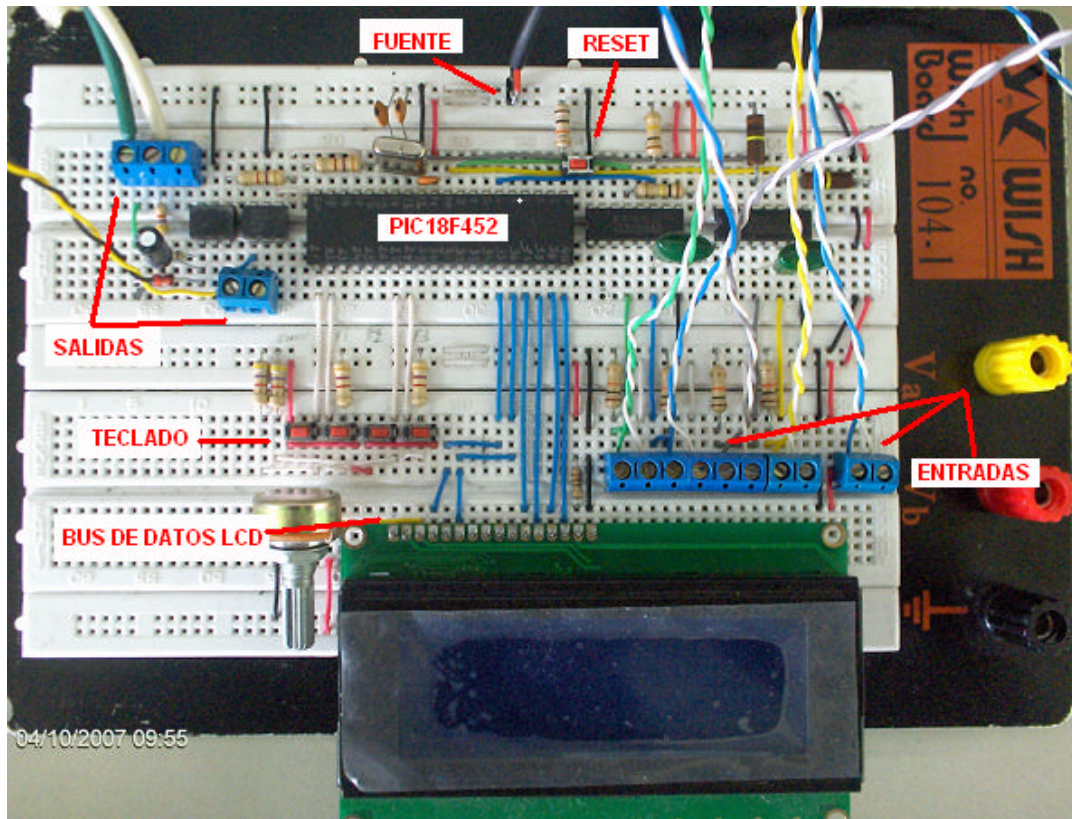


Figura 5—9 Pruebas de adquisición y control de datos.

Dentro de esta tarjeta se implementó el acondicionamiento de señal para medir los voltajes, éstos se hallan aislados galvánicamente del sistema de potencia por medio de transformadores individuales; para prevenir ingreso de fluctuaciones, en cada sensor, se incluyó una etapa de filtrado de la señal.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de esta tarjeta, se implementó el circuito impreso en una placa de baquelita de 20x30 cm. En el Anexo D se incluye el diseño del circuito impreso y la distribución de elementos de esta tarjeta.

5.2.4 Pruebas de la Tarjeta para el Voltímetro Diferencial.

Esta tarjeta es la encargada de sensar el voltaje diferencial entre los bornes L1 – U; una vez obtenido el dato, ésta lo presenta en un voltímetro de 20 led's, cada led encendido equivale a 11 Vac, por lo que el voltímetro diferencial tiene una escala de 0 a 220 Vac. En la figura 5-10 se muestra el diagrama esquemático del voltímetro diferencial.

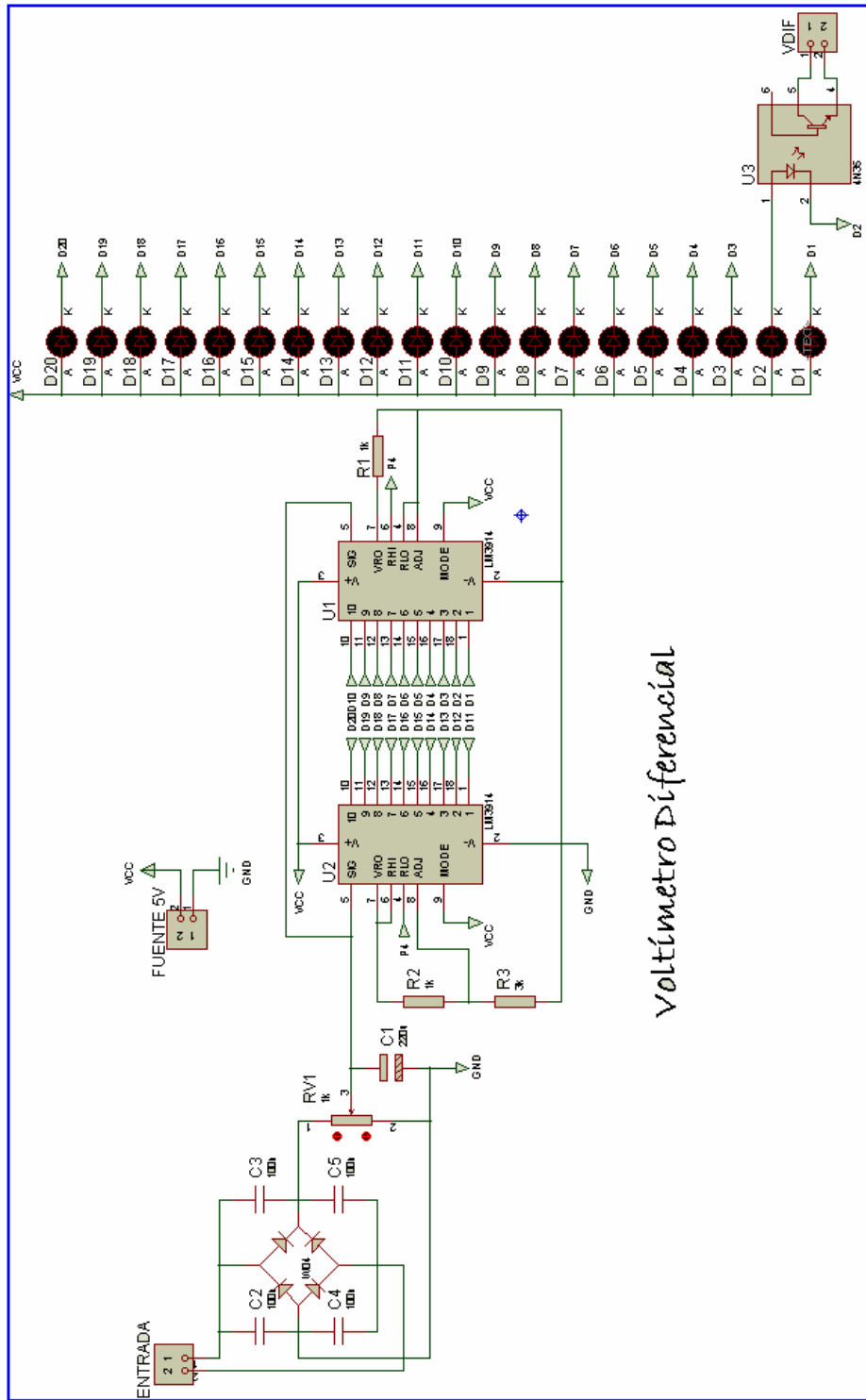


Figura 5—10 Diagrama esquemático del voltímetro diferencial.

En la figura 5-11 se muestra la implementación del circuito de prueba del voltímetro diferencial.

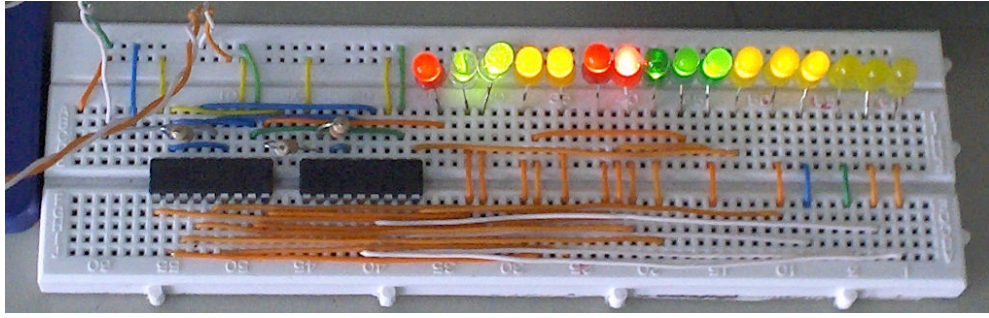


Figura 5—11 Voltímetro diferencial

Esta tarjeta también posee una fuente independiente de alimentación y un sensor de voltaje analógico incorporado en la misma, que se conecta al pin 5, que es la entrada de voltaje de referencia. Determinado el correcto funcionamiento de los circuitos, se diseña el circuito impreso cuyo screen se presenta en el Anexo D de este documento.

5.3 Instalación y montaje.

Una vez construidas las tarjetas, se las ensambló en forma modular, una sobre otra, para facilitar las conexiones con el panel frontal. La figura 5-12 detalla la disposición de las tarjetas.

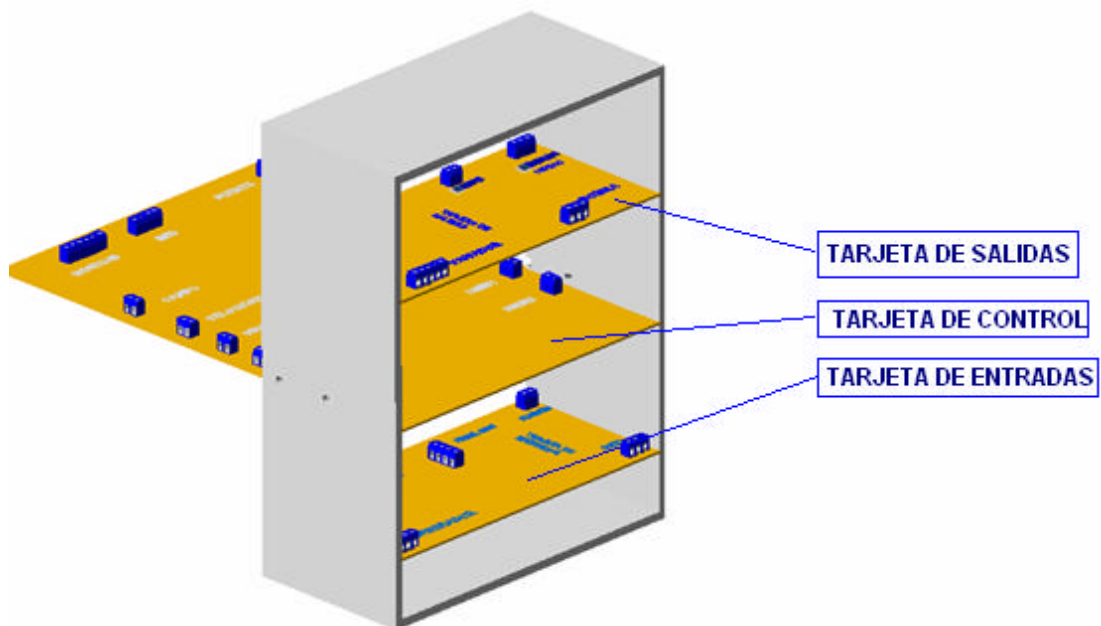


Figura 5—12 Disposición modular de las tarjetas.

El panel frontal del módulo se indica en la figura 5-13, en la parte inferior derecha se ha colocado un interruptor general que energiza a todas las tarjetas del módulo, éste tiene una señalización visual on - off, y en cada fuente se ha incluido un led, que indica cuando la fuente está encendida.

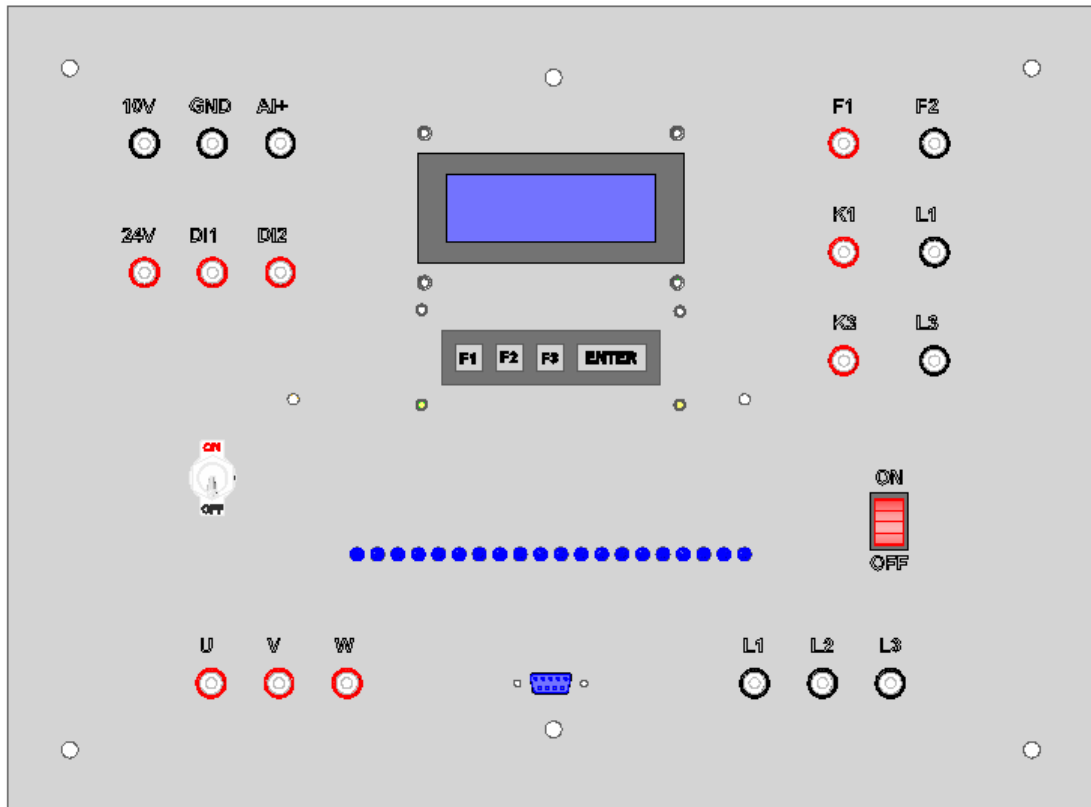


Figura 5—13 Parte frontal del módulo de sincronización automático.

En la parte inferior izquierda del panel frontal se implementó un interruptor, con señalización visual de estado, para energizar manualmente el contactor de puesta en paralelo. Además se ha montado el LCD, el teclado, el voltímetro de led's y el puerto de comunicación serial, así como los bornes de entrada de datos y los bornes de salida o control.

El módulo está diseñado para funcionar con alimentación monofásica de 120V disponibles en el Laboratorio, y está construido para ajustarse a la conexión y cableado con el resto de módulos y accesorios del Laboratorio.

5.4 Calibración.

Voltaje. En la sección 3.3.1 se diseñó el circuito de acondicionamiento de señal para sensar el voltaje RMS de la señal de entrada y transformarla a señal normalizada de 0 a 5 Vdc, para un voltaje de entrada de 0 a 250 Vrms, siendo éste el voltaje máximo que se puede aplicar a la entrada del módulo.

En la figura 5-14 se muestra la lectura del voltaje de red, empleando las entradas correspondientes del módulo de sincronización, y conectado a éstas un voltímetro FLUKE como instrumento patrón.

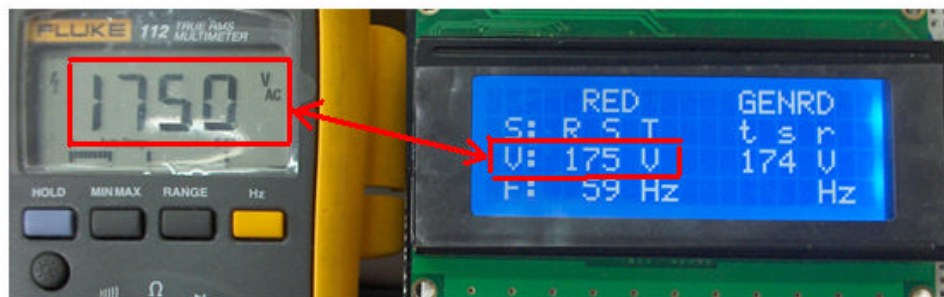


Figura 5—14 Calibración del voltaje.

Para la prueba de calibración se generaron señales de 0 a 250 Vrms, a la salida del circuito de acondicionamiento se obtuvo los correspondientes en DC, obteniendo los valores que se indican en la tabla 5-1.

Voltaje de entrada	Voltaje de salida
0	0
50	0,975
100	1,952
150	2,929
200	3,905
220	4,296
250	4,882

Tabla 5—1 Voltaje de entrada vs. Voltaje de salida.

Si se grafican los valores de la tabla 5-1, se tiene como resultado que el acondicionamiento de la señal es totalmente lineal, tal como se puede apreciar en el diagrama de la figura 5-15.

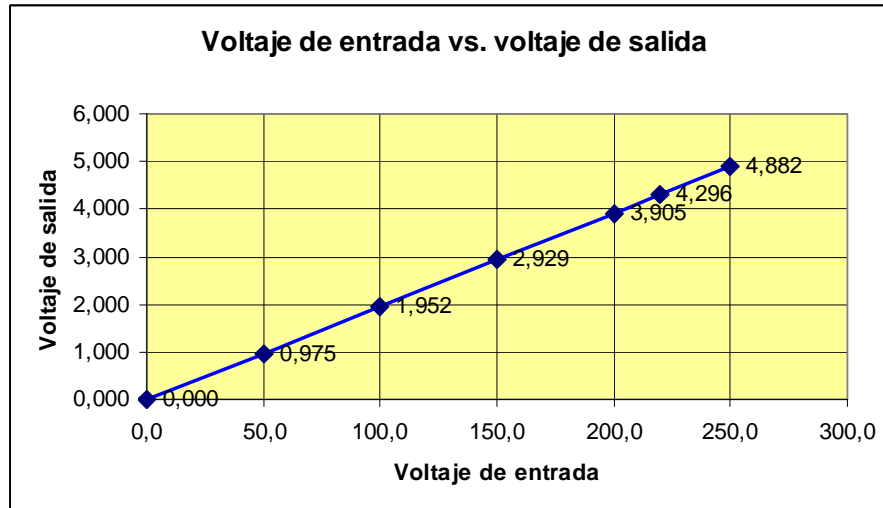


Figura 5—15 Diagrama de linealidad de voltaje.

El conversor A/D del PIC se configuró para trabajar a 10 bits que equivalen a un rango decimal de 0 a 1024, por lo tanto la resolución a la que se mide el voltaje es de 0.25 volts/bit.

El voltaje de salida se obtiene, al multiplicar el dato decimal que proporciona el conversor A/D por la resolución de la conversión.

Frecuencia. Para calibrar la señal de frecuencia, se conecta las tres fases de la Red eléctrica, se da un pulso que habilita un temporizador y un contador del microcontrolador en el mismo instante, el temporizador genera una interrupción cuando pasa un segundo de tiempo, durante este período el contador cuenta los pulsos de frecuencia que genera el circuito de acondicionamiento descrito en la sección 3.3.2; una vez ocurrida la interrupción se envían los datos al LCD; se resetea el contador, el temporizador y el bit que genera la interrupción. En la figura 5-16 se muestra el dato de frecuencia medido por el microcontrolador y la frecuencia medida por el frecuencímetro FLUKE usado como instrumento patrón.

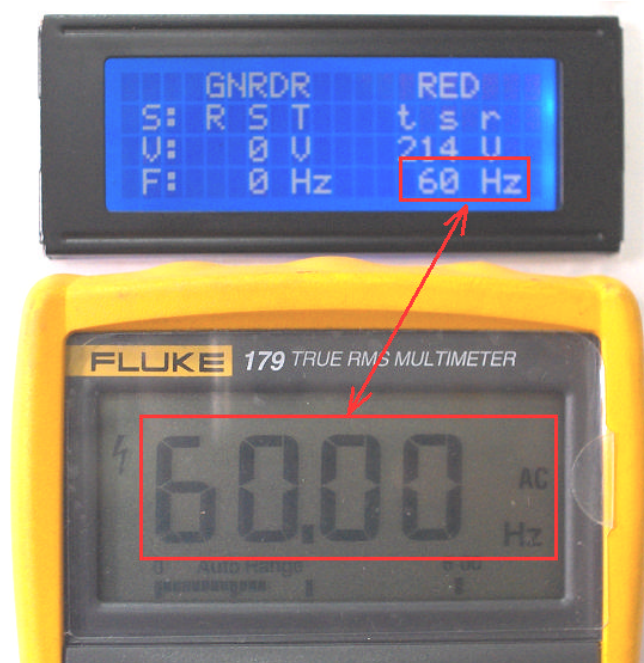


Figura 5—16 Calibración de la frecuencia.

Por lo tanto cada vez que se solicite el dato de frecuencia se activará el temporizador durante un segundo y se seguirán los pasos descritos en la calibración de frecuencia. El tiempo es generado por el reloj externo conectado al microcontrolador.

Corriente. Para calibrar la señal de corriente se aplicó una corriente de línea de 0.25 Arms, en la resistencia conectada en el secundario se mide un voltaje de 0.125V, a la salida del amplificador se tiene un voltaje de 2.25V que equivale a un dato de 512, la resolución entonces es de 0.00049 amperios/bit. La corriente se obtiene al multiplicar el dato del conversor A/D por la resolución.

5.5 Pruebas de funcionamiento.

Antes de energizar el módulo se debe asegurar que el interruptor de puesta en paralelo esté en la posición OFF. Una vez energizado el módulo se accede a la pantalla principal, en ella se habilita tres funciones específicas a los botones del teclado: ver, manual y automático; necesarios para controlar el módulo. La figura 5-17 muestra los botones de la página principal.



Figura 5—17 Botones para iniciar el control del módulo.

Al pulsar el botón VER, aparece la pantalla con los parámetros de la Red Eléctrica y del Generador, para iniciar la adquisición de datos se pulsa la tecla ENTER, a continuación se presenta en el LCD los 6 valores requeridos: voltaje, frecuencia, secuencia de cada sistema. En la figura 5-18 se describe la presentación de datos, para salir de esta pantalla se presiona la tecla F3 por 3 segundos.



Figura 5—18 Supervisión de datos.

Si se pulsa el botón MANUAL, se tiene acceso al control independiente de cada parámetro del generador a través del teclado, en cada ventana que aparece se informa al operador la función asignada a cada tecla. La pantalla de control de frecuencia y la de control de voltaje tienen la misma apariencia y función de teclas; con la tecla F1 se incrementa la relación de trabajo y la tecla F2 la resta, además de permitir el control, esta pantalla también indica el valor en tiempo real de la frecuencia o voltaje del generador, respectivamente; según la pantalla en la que se encuentre.

Otra característica de la pantalla de control manual es que se puede acceder a la pantalla de supervisión de datos pulsando la tecla F3, con la tecla ENTER se aceptan los datos y se puede cambiar de variable a controlar. En la figura 5-19 se describe la pantalla de control manual de voltaje.



Figura 5—19 Control manual de voltaje.

Cuando el Generador está en SINCRONIZACIÓN con la Red Eléctrica, hay que visualizar el voltímetro diferencial; éste indica visualmente el desfase existente entre las fases homólogas; varía constantemente en el tiempo y a una velocidad relativamente alta; pero, se estabiliza mostrando variaciones lentas de voltaje cuando el voltaje y frecuencia del generador son exactamente iguales a los parámetros de la Red.

El voltímetro diferencial tiene un rango de 0 a 250 Vrms; como se halla formado por un conjunto de 20 led's, cada uno representa un voltaje de 12.5 Vrms, y cuando éste indique 0 Voltios se debe cerrar el interruptor de puesta en paralelo, en la figura 5-20 se muestra el voltímetro diferencial indicando el instante que mide el voltaje mínimo y voltaje máximo, respectivamente.



Figura 5—20 Mínimo y Máximo Voltaje Diferencial.

Una vez acoplado el generador, las teclas F1 y F2 tienen la misma función inicial, esto con el fin de realizar el control de potencia; activa, si se varía la velocidad de la máquina motriz, y reactiva, si se varía el flujo de campo (esta opción está disponible sólo en control manual).

Para desacoplar el generador, se abre el interruptor de puesta en paralelo, para detener el control se retorna a la página de control manual y se pulsa la tecla F3, o a su vez, se puede reducir la relación de trabajo hasta llegar a 0.

Para el control automático, se pulsa la tecla F3 en la pantalla principal, se debe cerrar el interruptor de puesta en paralelo (posición ON), cuando lo solicite el programa; en la pantalla pide presionar la tecla ENTER para confirmar la elección de control automático.

Después de pulsar la tecla de aceptación se realiza la adquisición de datos de la Red Eléctrica que son el setpoint para el control automático, a continuación inicia el control automático, dotando de velocidad y voltaje de campo para comprobar si la secuencia de fases es correcta; de no ser así, se invierte el giro de la máquina motriz, se verifica nuevamente la secuencia de fases y si están en el mismo sentido se continua con el control.

El siguiente paso que ejecuta el programa es el control PID, éste actúa hasta que los valores medidos en el generador sean iguales a los de la Red. En las pruebas realizadas se determinó dejar el control calibrado como P, ya que con el control PID se tenía problemas con la sincronización debido al excesivo tiempo que tomaba en realizar dicha acción. Tomando como referencia la tabla 4-9 se determina que el control P puede ser aplicado en procesos donde la variable a controlar no es tan estricta.

Realizada dicha calibración, el control se ejecuta hasta cuando se cumplen con los parámetros descritos de error, de +/- 0.5% para la frecuencia y +/- 0.8 % para el voltaje (especificado en la página 145); en ese instante el Generador queda en SINCRONIZACION con la Red Eléctrica. Finalmente el programa mide el voltaje diferencial y automáticamente se envía la señal de cierre del interruptor cuando el microcontrolador decida que es el instante correcto.

Una vez realizado el acoplamiento, inicia la comunicación entre el Módulo y el PC; en el módulo se deshabilitan las teclas ENTER, F1 y F2; y el control de potencia únicamente se puede hacer desde el programa creado en LabView. Al pulsar la tecla F3 por más de 1 segundo, tiene la función de salir del control automático, reseteando todos las variables digitales y analógicas de salida.



Figura 5—21 Verificación visual del estado de la comunicación

El programa creado en el microcontrolador lee los datos que se envían desde el PC, a continuación varía la salida si se solicita; luego envía los datos monitoreados para que sean analizados y presentados en el PC, este lazo se repite hasta que el operador decida terminar el control, para ello se puede pulsar en el botón OFF de la pantalla del PC o la tecla F3 en el módulo. Para asegurar que se reciben y envían los datos desde y hacia el PC, en la pantalla del módulo aparece un punto que titila si la comunicación es correcta, en la figura 5-21 se muestra esta pantalla de comprobación de comunicación. Si se produce algún problema, este punto deja de titilar y corresponde revisar los cables de conexión.

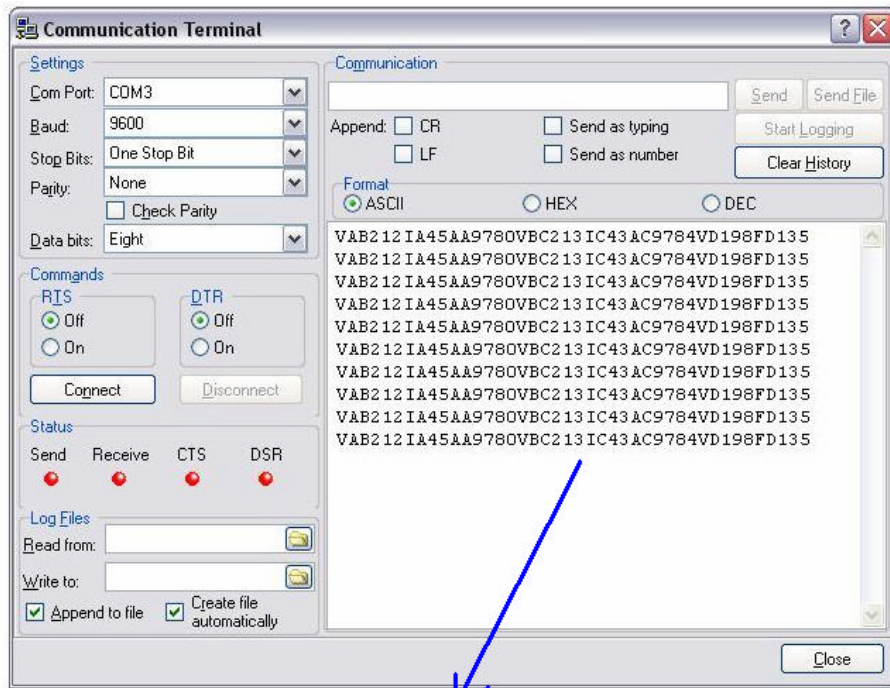
5.6 Pruebas de comunicación.

Una vez realizadas los ensayos individuales de los circuitos de prueba; construido e implementado el módulo, calibrado y comprobado el sistema de adquisición y control de datos, resta realizar las pruebas de comunicación entre el Módulo y el PC. En el Anexo E se muestra las fotografías, de la constitución interna del módulo, el panel frontal y de todo el sistema en conjunto.

Para realizar las pruebas de comunicación empleó el software *Communication Terminal*, que es una herramienta de Mikrobasic y permite acceder al puerto serial y configurarlo de acuerdo al formato de comunicación serial a la que este trabajando el microcontrolador, que para este caso es 8N1 a 9600 baudios/seg de velocidad.

5.6.1 Transmisión y recepción de datos.

Los datos desde el microcontrolador se los envía en forma de cadena, uno a continuación de otro, como dato tipo *string*; cada dato se envía con un identificador para su posterior reconocimiento en el programa de recepción (LabView), el identificador consiste en anteponer letras del alfabeto antes del dato. En la figura 5-22 se muestran los datos enviados desde el microcontrolador.



VAB212 IA45 AA9780 VBC213 IC43 AC9784 VD198 FD135

Figura 5—22 Datos enviados por el microcontrolador.

Una vez comprobado que los datos enviados son correctos, se ejecuta la aplicación creada en LabView para el monitoreo. En la figura 5-23 se muestra indica el monitoreo de las variables del Módulo de Sincronización Automático.



Figura 5—23 Monitoreo del Módulo de Sincronización Automático.

Para la prueba de transmisión de datos desde LabView se mostró en la pantalla del LCD la cadena de caracteres que recibe el microcontrolador, en la figura 5-24 se muestra los datos recibidos en el Módulo de Sincronización.

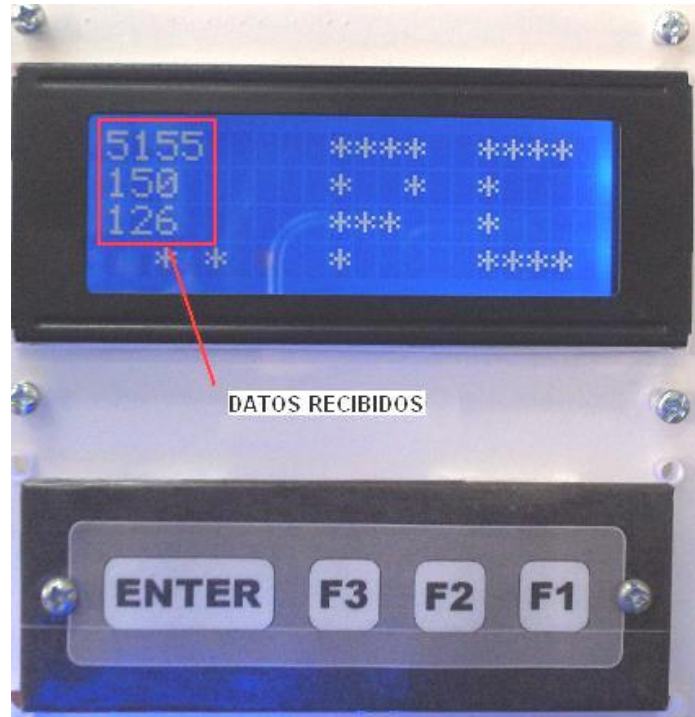


Figura 5—24 Recepción de datos para el control del módulo.

Los datos mostrados en la pantalla del LCD que indica la figura 5-24 son mostrados únicamente para realizar las pruebas de comunicación, una vez corregidos los errores, los datos serán manejados internamente por el microcontrolador.

En el programa del microcontrolador se dividen esta cadena en tres, se administra las tres variables independientemente y se las convierte en datos decimal para poder realizar los ajustes requeridos por el PC.

5.7 Análisis técnico-económico.

Al realizar este análisis, se puede determinar si es rentable efectuar la inversión económica para el desarrollar el proyecto.

En la tabla 5 – 2 se detalla el costo de los componentes adquiridos para la implementación del proyecto.

Cantidad	Componentes	Valor unitario	Valor total
1	Microcontrolador PIC18F452	11,00	11,00
1	Adaptador MAX232	2,50	2,50
2	Driver ULN2003	0,80	1,60
4	Driver ULN2803	1,20	4,80
2	Amplificador operacional LM324	0,70	1,40
7	Optoacoplador 4N25	0,45	3,15
6	Optoacoplador 4N35	0,50	3,00
2	Conversor A/D LM3914	3,50	7,00
2	Flip flor 74HC74	2,00	4,00
1	Mosfet IRFP 450	4,50	4,50
1	Puente de diodos KBL005	1,00	1,00
7	Puente de diodos 2W10	0,50	3,50
1	Diodo ultrarrápido NTE598	3,50	3,50
4	Regulador L7805	0,60	2,40
1	Regulador L7809	0,70	0,70
1	Regulador L7908	0,70	0,70
2	Regulador L7812	0,80	1,60
2	Diodos 1N4007	0,10	0,20
5	Transistor 1N3904	0,10	0,50
8	Diodos LED normales	0,20	1,60
20	Diodos LED de alto brillo	0,35	7,00
5	Diodo zéner 5.1V	0,15	0,75
1	Diodo zéner 10V	0,20	0,20
6	Potenciómetro de preescisión 1K	1,50	9,00
75	Resistencias ½W	0,05	3,75
12	Capacitores de 10uF 25V	0,35	4,20
6	Capacitores de 1000uF 25V	0,60	3,60
6	Capacitores de 2200uF 25V	0,80	4,80

2	Capacitores de 330uF 250V	2,00	4,00
25	Borneras para placa 2 polos	0,40	10,00
10	Borneras para placa 3 polos	0,60	6,00
1	Conector DB9 macho para placa	2,50	2,50
25	Capacitores cerámicos 100nF	0,10	2,50
8	Capacitores multicapa 100nF 110V	0,30	2,40
2	Capacitores cerámicos 22pF	0,10	0,20
1	Cristal de 20MHz	0,70	0,70
6	Zócalos 18 pines	0,10	0,60
7	Zócalo 14 pines	0,10	0,70
	Zócalo 8 pines	0,05	0,05
1	Zócalo ZIF	4,50	4,50
4	Conectores para placa 16 pines	0,80	3,20
2	Conectores para placa 8 pines	0,60	1,20
4	Transformador 220/12V 300mA	1,50	6,00
5	Transformador 110/12V 300mA	1,50	7,50
1	Transformador 220/110V 200W	17,00	17,00
1	Cable bus de datos 16 pines 1/2m	1,00	1,00
1	LCD 20x4 QY2004A.	18,00	18,00
1	Teclado	1,00	1,00
18	Jacks	0,20	3,60
2	Interruptor	0,70	1,40
2	Placa de acrílico 50x40cm	10,00	20,00
2	Cable 18AWG apantallado (metros)	1,50	3,00
3	Placa de baquelita 20x10cm	2,00	6,00
1	Contactador 3polos bobina 220V	17,00	17,00
1	Placa de baquelita 30x20cm	0,80	0,80
1	Imprevistos	30,00	50,00
TOTAL (USD)			282,80

Tabla 5—2 Costo de componentes.

La diferencia del presupuesto real con el planteado en el ante proyecto es de 1067 USD. Esto es debido a que al inicialmente se realizó una valoración global, ya que no se tenía identificado claramente el material necesario para la ejecución del proyecto. Esta gran diferencia se presenta además porque inicialmente se planteaba emplear una tarjeta DAQ; con el reemplazo de ésta por el microcontrolador el ahorro es muy notorio.

Cabe recalcar que en el análisis de costos no se incluye las horas de trabajo del autor, aspecto que provoca un incremento significativo en el costo del proyecto, pero este valor se modificaría al producirlo en serie.

Por otro lado el costo de un relé de sincronismo marca CIRCUITOR bordea los 600 USD. Al comparar los sistemas ofrecidos en el mercado para realizar la misma aplicación, queda abierta la posibilidad de una producción masiva del producto, tomando en cuenta el costo y las ventajas extras que posee el módulo desarrollado.

CAPITULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.

- El proyecto desarrollado consiste en el diseño e implementación de un Sistema de Sincronización de Generadores Automático, ejecuta las funciones de un sincronoscopio convencional, realiza el acoplamiento automático de los sistemas y permite controlar la Potencia en forma virtual desde un computador por medio de comunicación serial.
- Con la implementación de éste proyecto se dió cumplimiento a todos los objetivos planteados en su inicio. El resultado es un módulo confiable que cumple con las expectativas puestas en su desarrollo.
- El módulo es un aparato portátil, fácil de conectar, y operar; construido pensando en las necesidades del usuario y en la estética del entorno de operación. Todos los elementos que lo conforman son de fácil adquisición en el mercado local-nacional, en el caso que se requiera el reemplazo de alguno de ellos.
- La operación de puede efectuar de tres modos; el modo manual habilita el control desde el teclado de la velocidad y voltaje generado desde el panel de operación; el modo automático se lo inicia desde el teclado, una vez confirmada la acción se deshabilita las funciones de las teclas; el modo remoto, deshabilita toda función del teclado y habilita las funciones del PC.

- El acoplamiento automático del generador se realiza en un tiempo promedio de 40 segundos, éste es el tiempo de sincronización con control proporcional.
- Se sometió a pruebas durante 7 horas diarias durante 40 días. Esta prueba determinó que el acoplamiento y control de potencia es confiable con el módulo de sincronización.
- El módulo de sincronización está manejado por un solo microcontrolador, el mismo que es el encargado de: adquirir las señales digitales y analógicas, administrar los datos para presentarlos en la pantalla del módulo, enviar la señal de control al generador y establecer la comunicación por medio de protocolo RS-232 para la supervisión y control por PC.
- Para evitar interferencias externas que puedan afectar al funcionamiento del microcontrolador, se implementó al módulo con una jaula de Faraday, el chasis de ésta debe ir aterrizada a tierra para asegurar su funcionamiento.
- El módulo tiene las siguientes características técnicas; en los bornes de entrada de RED y entrada GENERADOR soporta 240Vac máximo, en los bornes de entrada K1 - L1 y K3 - L3 se debe conectar los bornes correspondientes del módulo *transformador de intensidad* 010.421, las salidas DI1 y DI2 manejan 1 A máximo de corriente, en los bornes de la fuente externa de 10V la salida AI+ puede entregar máximo 150mA, los bornes F1 y F2 pueden entregar máximo 1.5A de corriente.
- La programación de microcontroladores con lenguaje BASIC es confiable y de fácil comprensión. Proporcionando un entorno amigable al programador, para desarrollo de aplicaciones industriales sin limitación.
- La comunicación entre el microcontrolador y el software LabView es posible, asegurándose de la correcta configuración del módulo de comunicación y comprensión del funcionamiento del protocolo.

- El empleo de microcontroladores para el control procesos es viable, asegurando: un correcto diseño del sistema de adquisición, un adecuado acondicionamiento de señales y un eficiente diseño de los filtros para eliminar las interferencias que distorsionan las señales de entrada.
- Existe un ahorro económico considerable al reemplazar un microcontrolador, por un PLC o por una tarjeta de adquisición de datos DAQ, en el desarrollo de proyectos de automatización.

6.2 Recomendaciones.

1. Antes de empezar a desarrollar el proyecto es recomendable analizar el funcionamiento del proceso a ser automatizado, para ellos es necesario realizar una investigación adecuada para tener una perspectiva clara de lo que se quiere hacer.
2. Programar de forma adecuada el tiempo de ejecución de las actividades de desarrollo, las mismas deben ser previamente analizadas, luego diseñadas; posteriormente se debe hacer pruebas del prototipo y por último implementarlas; esto evitará efectuar un trabajo en vano.
3. Comprobar el funcionamiento de los circuitos diseñados, antes de plasmarlos en tarjetas, para evitar posteriores modificaciones que pueden terminar en el reemplazo total de la tarjeta.
4. No sobrepasar las características técnicas para las que fue diseñado el módulo, esto garantizará el correcto funcionamiento y conservación del mismo.
5. Nunca dejar en la posición ON el interruptor de puesta en paralelo situado en la parte inferior izquierda del panel de operación, ya que podría causar daños irreversibles en la tarjeta de entradas del módulo.

6. Cuando se elija el modo automático o remoto, asegurarse de que el variador de frecuencia esté encendido.
7. Revisar si la conexión de los cables es segura, cambiar cables con terminales flojos y defectuosos, si el contacto no es bueno pueden producirse pequeños arcos.
8. Para sensar variables eléctricas se puede reemplazar la circuitería de la tarjeta de entradas por un C.I. AD7758, este circuito integrado determina todos los parámetros eléctricos de un sistema trifásico y los guarda en localidades de memoria.
9. Se recomienda el software MikroBasic para desarrollar aplicaciones con microcontroladores, ya que posee librerías para las familias de microcontroladores PIC de última generación.
10. Para sensar la corriente se debe elegir un TC apropiado, si se elije un sobredimensionado se tienen pérdida de datos y el incremento de circuitería electrónica para amplificar la señal.
11. En las pruebas de control de potencia se recomienda cargar al generador con el 60% de la potencia nominal, si se sobrepasa este valor los valores de potencia no son exactos.