



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ININTERRUMPIDA (UPS) BASADO EN UN CONVERTIDOR TRIFÁSICO MEDIANTE MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO CON LA TÉCNICA SINUSOIDAL PWM (SPWM) CONTROLADO POR UN PROCESADOR DE SEÑALES DIGITALES (DSP)”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

Presentada por:

Francisco Javier Garzón Andrade

Mildred Rosa Mejía Orellana

René Douglas Padilla Rizzo

GUAYAQUIL - ECUADOR

2008

AGRADECIMIENTO

A nuestras familias, seres queridos, amigos y a todos quienes de alguna u otra manera nos brindaron su apoyo incondicional, e hicieron que esto sea posible.

DEDICATORIA

A nuestros padres, familiares,
seres queridos y amigos.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Holger Cevallos
SUB-DECANO DE LA FACULTAD
PRESIDENTE

Ing. Sífifo Falcones
DIRECTOR DEL TOPICO

Msc. Carlos Salazar
VOCAL PRINCIPAL

Ing. Carlos Valdivieso
VOCAL PRICIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Francisco Javier Garzón Andrade

Mildred Rosa Mejía Orellana

René Douglas Padilla Rizzo

RESUMEN

Este trabajo consiste en la implementación de un MODELO DIDACTICO de la operación de un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI ó UPS) de Línea Interactiva, basado en sus dos modos de operación INVERSOR PWM y RECTIFICADOR PWM, implementados de forma independiente.

El convertidor utilizado para esta aplicación es un Bloque Trifásico de IGBT con su respectivo circuito de disparo y protección.

La técnica del control de disparos escogida corresponde a la Modulación por Ancho de Pulso Sinusoidal (SPWM), para lo cual se usó un Procesador Digital de Señales (DSP) programable en la plataforma SIMULINK/MATLAB.

Este proyecto propone también una simulación de un lazo cerrado de control para la operación de un UPS.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO.....	II
DEDICATORIA.....	III
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN.....	IV
DECLARACIÓN EXPRESADA.....	V
RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VII
ABREVIATURAS.....	XIII
SIMBOLOGIA.....	XV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPITULO 1

1. Conceptos de Calidad de Energía.....	2
1.1. Calidad de Energía (Historia).....	2
1.2. Perdidas Calidad de Energía.....	5
1.3. Factores que afectan la Calidad de Energía.....	7
1.3.1. Transitorios.....	8
1.3.1.1. Disturbios Impulsivos.....	9

1.3.1.2. Disturbios Oscilatorios.....	10
1.3.2. Efectos de Corta Duración.....	11
1.3.2.1. Interrupciones.....	12
1.3.2.2. SAG de Tensión.....	12
1.3.2.3. SWELL de Tensión.....	14
1.3.3. Efectos de Larga Duración.....	15
1.3.3.1. Interrupciones Sustentadas.....	16
1.3.3.2. Sobretensiones.....	17
1.3.3.3. Subtensiones.....	18
1.3.3.4. Desequilibrio de tensión.....	18
1.3.4. Secuenciales.....	19
1.3.4.1. Armónicos.....	20
1.3.4.2. Notch.....	24
1.3.4.3. Ruido.....	25
1.3.5. Fluctuaciones de Tensión.....	26
1.3.5.1. Flicker.....	27
1.4. Compensadores de Calidad de Energía.....	28
1.4.1. Distributed Static Compensator (DSTATCOM).....	29
1.4.2. Dynamic Voltage Restorer (DVR).....	30
1.4.3. Uninterruptible Power Supply (UPS).....	32
1.4.4. Análisis de aplicación de los Compensadores.....	33

CAPITULO 2

2. Sistema de Alimentación Ininterrumpida (UPS).....	35
2.1. Historia de los UPS.....	36
2.2. Definición y Funcionamiento de un UPS.....	37
2.3. Topologías modernas de los UPS.....	39
2.3.1. UPS Standby.....	40
2.3.2. UPS Standby Ferro.....	42
2.3.3. UPS Línea Interactiva.....	42
2.3.4. UPS Doble Conversión On-Line.....	45
2.3.5. UPS Conversión On-Line Delta.....	47
2.3.6. Aplicaciones de las Topologías.....	48
2.3.6.1. Ventajas y Desventajas.....	49
2.4. Selección de la Topología a utilizar.....	53
2.5. UPS Línea Interactiva.....	53
2.5.1. Principio de Funcionamiento.....	54
2.5.2. Ventajas y Desventajas.....	56
2.5.3. Etapas de operación.....	57
2.5.3.1. Etapa Inversora.....	57
2.5.3.2. Etapa Rectificadora.....	59
2.5.4. Características de la Batería.....	60
2.6. Características principales del UPS Línea Interactiva a diseñar.....	61

CAPITULO 3

3. Principios de Convertidores PWM.....	62
3.1. Convertidores DC-DC.....	62
3.1.1. Reductor (Buck).....	64
3.1.2. Elevador (Boost).....	65
3.1.3. Modelos.....	67
3.1.3.1. De gran señal.....	67
3.1.3.2. De pequeña señal.....	68
3.2. Convertidores Trifásicos.....	70
3.2.1. Inversor PWM.....	70
3.2.2. Rectificador PWM.....	74
3.2.3. Modulación Sinusoidal.....	75
3.2.4. Modelos.....	79
3.2.5. Controlador.....	86
3.2.5.1. Transformada de Park.....	87
3.2.5.2. Controladores PI.....	89
3.2.5.3. Circuito PLL.....	91
3.3. Diseño del Convertidor Trifásico para un UPS Línea Interactiva.....	93
3.3.1. Especificaciones.....	94
3.3.2. Cálculo de los parámetros del diseño.....	95
3.3.2.1. Cálculo de la Inductancia.....	95
3.3.2.2. Cálculo de la Capacitancia.....	99

3.3.2.3. Cálculo de Semiconductores.....	100
3.3.3. Simulaciones.....	101

CAPITULO 4

4. Diseño de Controladores Digitales.....	106
4.1. Principio de funcionamiento.....	106
4.2. Ventajas y Desventajas.....	108
4.3. Procesador digital de señal.....	109
4.3.1. Ventajas sobre Microcontroladores.....	111
4.3.2. La Familia TMS320C2000.....	112
4.3.3. Tarjeta eZdsp.....	114
4.4. Herramientas de Matlab.....	115
4.4.1. Simulink.....	115
4.4.2. PLECS.....	116
4.4.3. Target for TI C2000.....	117
4.5. Diseño del Controlador para un UPS Línea Interactiva.....	118
4.5.1. Especificaciones.....	119
4.5.2. Modelación.....	120
4.5.3. Simulaciones.....	124
4.6. Implementación en el DSP TMS320F2812.....	130
4.6.1. Herramientas utilizadas.....	131
4.6.2. Programa para la Implementación.....	132

OBSERVACIONES Y RESULTADOS.....	139
CONCLUSIONES.....	157
RECOMENDACIONES.....	159
PROYECTO FUTURO.....	159
BIBLIOGRAFIA.....	160
ANEXOS.....	163
ANEXO A: PLAN DE ACTIVIDADES.....	164
ANEXO B: ESQUEMÁTICOS.....	167
ANEXO C: HOJAS DE ESPECIFICACIONES.....	173
ANEXO D: IMPRESO DE TARJETAS.....	175
ANEXO E: ANALISIS DE COSTO.....	179

ABREVIATURAS

AC	Corriente Alterna
ADC	Convertidor análogo – digital
CEE	Calidad de la Energía Eléctrica
DAC	Convertidor digital – análogo
DC	Corriente Directa
DMA	Acceso directo de memoria
DMA	Acceso directo de memoria
DSP	Procesador digital de señales
DSTATCOM	Compensador Estático de Distribución
DVR	Restaurador Dinámico de Voltaje
f_s	Frecuencia de conmutación
GTO	Tiristores de desactivación por compuerta
Hz	Hertz
IDC	Corriente en el lado DC
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IMOD	Corriente modulada
IQN	Número entero con Q decimales
Ki	Constante de integración
MAC	Multiplicación y acumulación
MATLAB	Laboratorio de matrices

p.u.	Por Unidad
PCB	Tarjeta de circuito impreso
PI	Controlador proporcional integral
PLECS	Simulación de Circuitos Lineales Eléctricos
PLL	Lazo de seguimiento o enganche de fase
PM	Margen de fase
PQ	Calidad de la Potencia (Power Quality)
PWM	Modulación por ancho de pulsos
Rms	Valor eficaz
Sag	Depresión de tensión
SAI	Sistema de alimentación Ininterrumpida
SCR	Rectificadores de silicio controlado
SPWM	Modulación por ancho de pulsos (técnica senoidal)
SVPWM	Modulación por ancho de pulsos (técnica de vector espacial)
Swell	Salto de tensión
THD	Distorsión Total de Armónicos
TI	Texas Instruments
Ts	Período de conmutación
UPS	Sistema de Potencia Ininterrumpible
VA	Voltios Amperios
VDC	Voltaje en el lado DC
VMOD	Voltaje modulado

SIMBOLOGÍA

ΔX	Cambio en la señal X
C	Capacitancia
D	Ciclo de trabajo
IDC	Corriente DC
IL	Corriente de la carga
Is	Corriente de la fuente
IMAX	Corriente máxima
IMOD	Corriente moduladora
THD	Distorsión total armónica
fs	Frecuencia de conmutación
fc	Frecuencia de corte
Cos(Θ)	Función coseno
Gc	Función del controlador
Sen(Θ)	Función seno
M	Índice de modulación
L	Inductancia
Lmin	Inductancia mínima
PM	Margen de fase
Ts	Período de Conmutación
P	Potencia activa

PD	Potencia disipada en el IGBT
Q	Potencia reactiva
R	Resistencia
R_L	Resistencia de la carga
ΔI_L	Rizado pico a pico de la corriente
ΔV_o	Rizado pico a pico de voltaje
X_q	Señal de desfase en el marco rotacional
X_d	Señal de magnitud en el marco rotacional
α	Señal moduladora alfa
β	Señal moduladora beta
S	Interruptor apagado o abierto
t	Tiempo
ω	Velocidad angular
V_{DC}	Voltaje DC
V_{in}	Voltaje de entrada
V_s	Voltaje de la fuente trifásica
V_{out}	Voltaje de salida o voltaje en la carga
V_L	Voltaje en la carga
V_a	Voltaje en la fase a
V_b	Voltaje en la fase b
V_c	Voltaje en la fase c
V_{ab}	Voltaje entre líneas a y b

V_{bc}	Voltaje entre líneas b y c
V_{ca}	Voltaje entre líneas c y a
V_{MAX}	Voltaje máximo
V_{LMAX}	Voltaje máximo en el inductor
V_{MOD}	Voltaje modulador

INDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1	Esquema Sistema Eléctrico Inicial.....	3
Figura 1.2	Esquema Sistema Eléctrico Actual.....	3
Figura 1.3	Gráfica de un Impulso Atmosférico.....	10
Figura 1.4	Disturbio Oscilatorio.....	10
Figura 1.5	Interrupción.....	12
Figura 1.6	Depresión de Tensión (SAG).....	13
Figura 1.7	Incremento de Tensión (SWELL).....	15
Figura 1.8	Interrupción Sustentada	16
Figura 1.9	Sobretensión.....	17
Figura 1.10	Subtensión.....	18
Figura 1.11	Gráfica de Armónicos.....	22
Figura 1.12	Notch de Tensión.....	25
Figura 1.13	Ruido en una Señal de Tensión.....	26
Figura 1.14	Flicker.....	28
Figura 1.15	Esquema de un DSTATCOM.....	30
Figura 1.16	Foto de un DSTATCOM de marca PureWave.....	30
Figura 1.17	Esquema de un DVR.....	31
Figura 1.18	Foto de un DVR de marca PureWave.....	32

Figura 1.19	UPS ON LINE.....	33
Figura 1.20	Foto de un UPS de marca PureWave.....	33

Capítulo 2

Figura 2.1	Diagrama Básico de un UPS.....	38
Figura 2.2	Diagrama UPS Stand By.....	41
Figura 2.3	Diagrama UPS Stand By Ferro.....	42
Figura 2.4	Diagrama UPS Línea Interactiva.....	44
Figura 2.5	Diagrama UPS Doble Conversión Online.....	45
Figura 2.6	Diagrama UPS Delta Conversión Online.....	48
Figura 2.7	Efectividad vs. Frecuencia de Problemas de Calidad de Energía UPS – Stand By.....	51
Figura 2.8	Efectividad vs. Frecuencia de Problemas de Calidad de Energía UPS – Línea Interactiva.....	52
Figura 2.9	Efectividad vs. Frecuencia de Problemas de Calidad de Energía UPS – Doble Conversión.....	52
Figura 2.10	UPS Línea Interactiva – Operación Normal.....	54
Figura 2.11	UPS Línea Interactiva – Operación en Falla.....	54
Figura 2.12	UPS Línea Interactiva – Recarga de Batería.....	55
Figura 2.13	Estructura Inversor.....	58

Figura 2.14	Salida del Inversor.....	59
Figura 2.15	Estructura Rectificador.....	60

Capítulo 3

Figura 3.1	Esquema Convertidor DC-DC Básico.....	63
Figura 3.2	Forma de onda de un convertidor DC-DC.....	63
Figura 3.3	Convertidor Buck o Reductor.....	65
Figura 3.4	Convertidor Boost o Elevador.....	66
Figura 3.5	Diagrama de Gran Señal del Buck.....	68
Figura 3.6	Ecuaciones del Convertidor Buck Gran Señal.....	68
Figura 3.7	Circuito equivalente Pequeña Señal.....	69
Figura 3.8	Diagrama de Pequeña Señal del Buck.....	69
Figura 3.9	Ecuaciones del Convertidor Buck Pequeña Señal.....	70
Figura 3.10	Inversor Trifásico 6 Transistores y 6 Diodos.....	72
Figura 3.11	a) Modulación SPWM, b) Voltaje Modulado A, c) Voltaje Modulado B, d) Voltaje Modulado C, e) Voltaje V_{ab} , f) Voltaje V_{bc} , g) Voltaje V_{ca}	73
Figura 3.12	Rectificador con Modulación PWM.....	75
Figura 3.13	Comparación entre la Portadora y la Referencia.....	76
Figura 3.14	Voltajes Modulados Generados (V_{aN} , V_{bN} y V_{cN}).....	77

Figura 3.15	Unifilar de un UPS Línea Interactiva.....	79
Figura 3.16	Esquema Electrónico de un UPS Línea Interactiva.....	80
Figura 3.17	Esquema Electrónico del UPS MODO RECTIFICADOR.....	80
Figura 3.18	Trasformada de Clark.....	88
Figura 3.19	Trasformada de Park.....	89
Figura 3.20	Diagrama de Bloques de un Control PI.....	91
Figura 3.21	Diagrama de un Control PLL.....	92
Figura 3.22	Módulo Convertidor IRAMY20UP60B.....	94
Figura 3.23	Dimensiones del Núcleo T520-40.....	97
Figura 3.24	Programa para diseño de inductores de MICROMETALS.....	97
Figura 3.25	Ingreso de parámetros para el diseño del inductor.....	98
Figura 3.26	Resultados para el diseño del inductor.....	98
Figura 3.27	Parámetros Básicos para el IGBT.....	100
Figura 3.28	Convertidor MODO INVERSOR (Switch Abierto).....	101
Figura 3.29	Voltaje y Corriente en la Carga.....	101
Figura 3.30	Voltaje y Corriente Modulado.....	102
Figura 3.31	Corriente en la Batería.....	102
Figura 3.32	Convertidor MODO RECTIFICADOR (Switch Cerrado).....	103
Figura 3.33	Voltaje y Corriente en la Carga.....	103

Figura 3.34	Voltaje y Corriente Modulado.....	104
Figura 3.35	Corriente en la Batería.....	104

Capítulo 4

Figura 4.1	Lazo típico de Control.....	108
Figura 4.2	Diagrama de Bloques de un sistema de Procesamiento Digital.....	110
Figura 4.3	Foto del DSP TMS320F2812.....	113
Figura 4.4	Foto del eZdsp™F2812.....	114
Figura 4.5	Librerías Simulink.....	115
Figura 4.6	Librería PLECS.....	116
Figura 4.7	Bloques de Componentes de PLECS.....	116
Figura 4.8	Code Composer Studio.....	117
Figura 4.9	Librerías del Target para TI C2000.....	118
Figura 4.10	Ingreso de la función de Transferencia en SISOTOOL.....	120
Figura 4.11	Diagrama de BODE de magnitud y fase del sistema del Lazo abierto.....	121
Figura 4.12	Tiempo de estabilización.....	121
Figura 4.13	Calculo del compensador.....	122

Figura 4.14	Diagrama de BODE de magnitud y fase en Lazo cerrado.....	123
Figura 4.15	Tiempo de Estabilización en Lazo cerrado.....	123
Figura 4.16	Compensador PI VMOD / IMOD.....	124
Figura 4.17	Simulación del UPS de Línea Interactiva.....	125
Figura 4.18	Planta en Modelo Matemático del UPS.....	125
Figura 4.19	Planta Real del UPS.....	126
Figura 4.20	Bloque PWM Sinusoidal.....	126
Figura 4.21	Convertidor Trifásico.....	127
Figura 4.22	Transformada de Clark / Park $abc \rightarrow dq$	127
Figura 4.23	Corriente DC.....	128
Figura 4.24	Voltajes y Corrientes en la Carga.....	129
Figura 4.25	Corriente en el Inductores.....	129
Figura 4.26	Corriente de en el Inductor (Transformado Vector dq).....	130
Figura 4.27	Bloques de la Librería TI C2000 utilizados.....	132
Figura 4.28	Programa MODO INVERSOR.....	133
Figura 4.29	Entrada de Señales.....	133
Figura 4.30	Adecuación de Señal (Por Unidad).....	134
Figura 4.31	Control de Magnitud y Fase.....	134
Figura 4.32	Control de Magnitud y Fase.....	134
Figura 4.33	Matriz de Desfase.....	135

Figura 4.34	Generador Sinusoidal.....	136
Figura 4.35	Generación PWM.....	136
Figura 4.36	Adecuación de Señal (Porcentaje).....	137
Figura 4.37	Programa MODO RECTIFICADOR.....	137
Figura 4.38	Bloque ABC à <i>ab</i>	138

INDICE DE TABLAS

Capitulo 1

Tabla 1.1	Clasificación de los factores que afectan la Calidad de Energía.....8
Tabla 1.2	Comparación de los Compensadores según los problemas de Calidad de Energía que corrigen.....34

Capitulo 2

Tabla 2.1	Tabla comparativa de los atributos de diseño Vs. topologías de los UPS.....48
Tabla 2.2	Aplicaciones de las Topologías de UPS.....49
Tabla 2.3	Ventajas y desventajas del UPS – Stand By.....49
Tabla 2.4	Ventajas y desventajas del UPS – Línea Interactiva.....50
Tabla 2.5	Ventajas y desventajas del UPS – Doble Conversión...50
Tabla 2.6	Diferencias UPS Línea Interactiva y Doble Conversión.57

Capítulo 4

Tabla 4.1	Principales DSP, Fuentes: Revista EDN, May 1997,
-----------	--

	pagina 44.....	110
Tabla 4.2	Comparación Microcontrolador Vs. DSP.....	111
Tabla 4.3	Cuadro comparativo de las clases de procesador TMS320C2000.....	113
Tabla 4.4	Operación UPS para simulación.....	128

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los estándares de calidad son cada vez más exigentes, y un mercado globalizado demanda: bajos costos, alta rentabilidad, calidad y eficiencia. Curiosamente la Calidad de Energía guarda una estrecha relación con cada una de estas características, ya que la continuidad, confiabilidad y calidad del servicio eléctrico son decisivos, al poder ocasionar: la interrupción de un proceso de producción, el daño en equipos sensibles y tiempos de inactividad, que se traducen en pérdidas: económicas, de calidad y tiempo.

Por lo tanto, en la actualidad existen una serie de medidas correctivas y preventivas que se basan en un conjunto de equipos y técnicas que permiten asegurar la calidad de energía en el lado del consumidor.

Una de las medidas correctivas es el Sistema de Alimentación Ininterrumpida (UPS), que garantiza un suministro de electricidad en el evento de una falla en el suministro habitual, pudiendo también regular el flujo de electricidad, controlando las subidas y bajadas de tensión y corriente existentes en la red eléctrica, resultando especialmente útil ante cargas críticas, que requieran de una alimentación continua y limpia.

CAPÍTULO 1

1. CONCEPTOS DE CALIDAD DE ENERGÍA

1.1 Calidad de Energía (Historia)

Desde hace algunas décadas y como una respuesta a las necesidades de la industria y consumidores en general, ha habido un constante desarrollo tecnológico, con particular interés en la Electrónica de Potencia, con el propósito de cumplir con las exigencias de un mercado cada vez más competitivo que demanda calidad, continuidad de servicio energético, disminución de costos/pérdidas, procesos productivos eficientes, menor dependencia del personal de planta, entre otras cosas.

Se desarrollaron entonces, nuevas tecnologías con componentes más eficientes, que alteraron la característica cuasi lineal de las

cargas, transformándolas en su mayoría en NO LINEALES, alterando la respuesta habitualmente esperada de una forma sinusoidal en la corriente a otras con nuevas características.

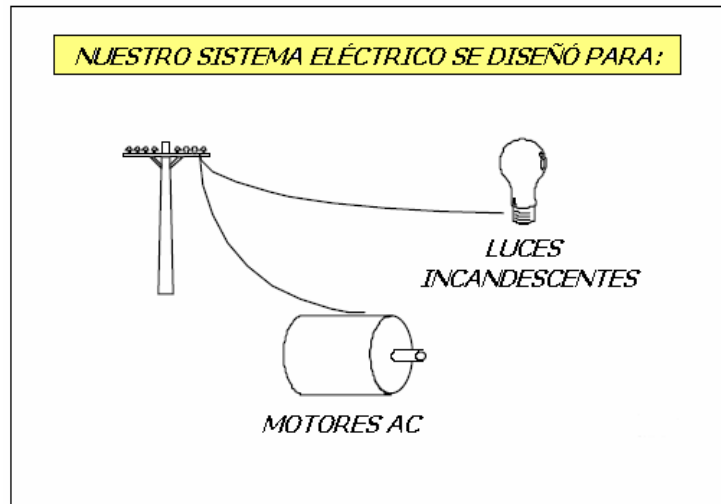


FIGURA 1.1 Esquema Sistema Eléctrico inicial.

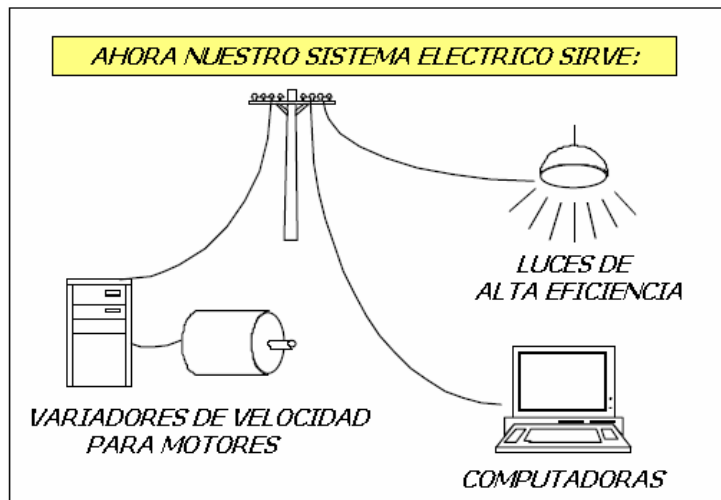


FIGURA 1.2 Esquema Sistema Eléctrico actual.

Con el cambio de comportamiento de la carga se alteró también el Sistema de Suministro de Energía Eléctrica, su precio y servicio, y dado que constituye un factor decisivo de la economía, se creó el concepto de Calidad de Energía, para cuyo desarrollo se trató el problema de forma integral, con investigación básica y aplicada.

El término de Calidad de Energía Eléctrica (CEE, en español y PQ- Power Quality, en inglés) está relacionado directamente con las perturbaciones que pueden afectar las condiciones eléctricas del suministro y ocasionar el mal funcionamiento o daño de equipos y procesos, por lo que la Empresa Distribuidora debe garantizar un servicio de costos viables, funcionamiento adecuado, seguro y confiable, sin afectar el medio ambiente o el bienestar de las personas. Técnicamente hablando para la Empresa Distribuidora esto implica un suministro con tensiones equilibradas, sinusoidales y de amplitudes y frecuencias constantes. [5]

A nivel mundial se viene realizando estudios importantes de Calidad de Energía desde hace 20 años, los que muestran que año a año aumentan los niveles de distorsión de tensión y señalan como causa principal a los equipos electrónicos o cargas no lineales conectadas a la red.

El objetivo de la Calidad de Energía es lograr un suministro con *calidad* corrigiendo disturbios y variaciones de voltaje en el lado del cliente y proponiendo soluciones para corregir fallas o problemas que se presentan en el lado del sistema de las compañías suministradoras de EE.EE., cuyo éxito depende tanto de las empresas de energía eléctrica como de los consumidores y de los fabricantes de equipos.

1.2 Pérdidas de Calidad de Energía

La carga es lo que determina las Pérdidas en la Calidad de Energía pudiendo provocar:

- Mal funcionamiento de los equipos conectados a la red distribuidora, tal como: Transformadores, Bancos de Capacitares, etc. Y errores en los datos.
- Corrientes excesivas en los conductores de neutro que lo sobrecalientan.
- Altos niveles de tensión entre los conductores de neutro y tierra los cuales causan errores en los datos.
- Sobrecalentamiento y ruido acústico en transformadores, motores y otros aparatos.

- Campos magnéticos muy intensos emitidos por transformadores.
- Disminución en el tiempo de vida de los equipos y sus elementos constitutivos.
- Sistemas de control electrónico que se paran inesperadamente.
- Reinicio de los sistemas de manera frecuente.
- Fallas inexplicables de motores y sistemas eléctricos.
- Circulación continua de corriente en el conductor de puesta a tierra.
- Bajo Factor de Potencia provocado por un calentamiento excesivo de los Bancos de Capacitares.
- Operación errónea de los dispositivos de control, los sistemas de señalización principal y relevadores de protección.
- Interferencia telefónica.
- Daños a tarjetas electrónicas.
- Variación de la velocidad o del par en motores.
- Apertura de contactores.
- Colapso de sistemas de computación o errores de medición en instrumentos equipados con dispositivos electrónicos.
- Fallas en la conmutación de convertidores.
- Parpadeo en luminarias.
- Bloqueo de programas de PLC's.
- Baja eficiencia en motores eléctricos, entre otros.

A nivel industrial un mantenimiento preventivo constante y la instalación de equipos de protección y de control, resultan fundamentales para disminuir dichas Pérdidas.

Mientras que para las compañías suministradoras una acción preventiva corresponda a la utilización de equipos que puedan proporcionar información acerca de las operaciones del sistema eléctrico en condiciones normales y anormales, ayudando a evitar fallas catastróficas debido a cortos circuitos, resaltando áreas con problemas potenciales, ilustrando el efecto de la presencia de armónicas e identificando las oportunidades para ahorrar costos con la reducción de la máxima demanda.

1.3 Factores que afectan la Calidad de Energía

A nivel industrial existen diversos factores que afectan la Calidad de Energía, entre los cuales se encuentran:

- Las Instalaciones de sistemas eléctricos y electrónicos altamente sensibles en instalaciones antiguas;
- La Instalación de equipos sensibles en instalaciones nuevas, cuyos diseños no previenen problemas de calidad de energía;

- Planes de protección inadecuados o inexistentes;
- Diseño inadecuado de las instalaciones eléctricas y los Sistemas de puesta a tierra; entre otros.

Para un mejor entendimiento de los factores que afectan la Calidad de Energía, éstos han sido clasificados según su duración y forma en la Tabla 1.1:

CATEGORIA	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD TÍPICA DE VOLTAJE
1. TRANSITORIOS		
1.1 Transitorio Impulsivo	< 0,5 ciclos	
1.2 Transitorio Oscilatorio	< 0,5 ciclos	0 - 8 p.u.
2. CORTA DURACIÓN		
2.1 Interrupción	0,5 ciclos - 1 min	< 0,1 p.u.
2.2 Depresión de Tensión (SAG)	0,5 ciclos - 1 min	0.1 - 0.9 p.u.
2.3 Salto de Tensión (SWELL)	0,5 ciclos - 1 min	1.1 - 1.8 p.u.
3. LARGA DURACIÓN		
3.1 Interrupción Sostenida	> 1 min	0 p.u.
3.2 Subtensión	> 1 min	0.8 - 0.9 p.u.
3.3 Sobretensión	> 1 min	1.1 - 1.2 p.u.
4. DESEQUILIBRIO DE TENSIÓN	Estado Estable	0.5 - 2%
5. DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA		
5.1 Armónicos	Estado Estable	0 - 20%
5.2 Corte	Estado Estable	
5.3 Ruido	Estado Estable	0 - 1%
6. FLUCTUACIONES DE TENSIÓN (FLICKER)	Intermitente	0.1 - 7%

TABLA 1.1 Clasificación de los factores que afectan la Calidad de Energía

1.3.1 Transitorios

Son clasificados como Transitorios aquellos eventos indeseables en el sistema que son de naturaleza momentánea. La duración en que se presentan estos eventos es aproximadamente menor a 0.5 ciclos.

Generalmente son causados por descargas atmosféricas, así como también por maniobras de interruptores, por oscilaciones comúnmente debidas a la conexión de Bancos de Capacitares y por cambios súbitos en el sistema de suministro. Se clasifican en:

- Disturbios Impulsivos, y,
- Disturbios Oscilatorios.

3.1.1.1 Disturbios Impulsivos

CARACTERÍSTICAS	<p>1 No provoca alteraciones en las condiciones de estado estable de tensión o corriente.</p> <p>2 Se atenúa rápidamente por la resistencia del sistema debido a que no tiene frecuencia, por lo que no se propaga muy lejos del lugar de origen.</p> <p>3 Tiene polaridad unidireccional.</p>
ORIGEN	Son de origen atmosférico, llamados también impulsos atmosféricos.
EFFECTOS	Pueden causar falla inmediata en el aislamiento de los equipos y fuentes electrónicas.

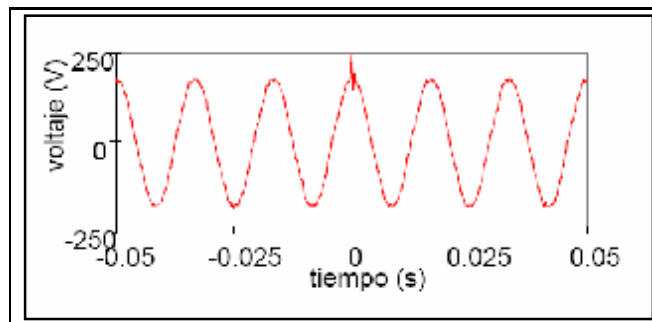


FIGURA 1.3 Gráfica de un impulso atmosférico

3.1.1.2 Disturbios Oscilatorios

CARACTERÍSTICAS	Provoca variaciones de tensión y corriente. Sus valores instantáneos cambian de polaridad rápidamente.
ORIGEN	Son causados por las modificaciones de la configuración de un sistema, por ejemplo: maniobras en líneas de transmisión, enclavamiento de Bancos de Capacitores, etc.
EFFECTOS	Pueden causar la quema o daño en equipos electrónicos.

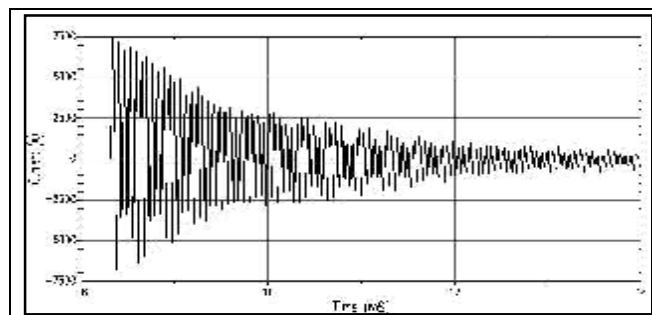


FIGURA 1.4 Disturbio Oscilatorio

Como posibles soluciones para mitigar estos problemas se tiene: El uso de Sistemas de Alimentación Ininterrumpidas (SAI, conocido como UPS, por sus siglas en inglés), Protectores Electrónicos de SAG's (Filtros Activos), Transformadores de Aislamiento y Acondicionadores de Calidad de Energía Eléctrica (Power Quality Conditioners).

1.3.2 Efectos de Corta Duración

Los efectos de corta duración son eventos originados por fallas en el sistema eléctrico, y por la energización de grandes bloques de carga. La duración en que se presentan estos eventos es de aproximadamente 0.5 ciclos a 1 min. Su clasificación depende de la localización de la falla y las condiciones de operación del sistema, pudiendo ocasionar tres tipos de efectos de Corta Duración: [9]

- Interrupciones,
- Depresión de tensión (SAG), y,
- Elevación de Tensión (SWELL).

3.2.1.1 Interrupciones

CARACTERÍSTICAS	Presentan un decremento de la tensión de alimentación a un valor menor que 0.1 p.u. por un periodo de 0.5 ciclos a 1 minuto.
ORIGEN	Puede ser el resultado de fallas en el sistema eléctrico de los equipos o del mal funcionamiento de los sistemas de control.
EFECTOS	Causan daño o mal funcionamiento de los equipos electrónicos.

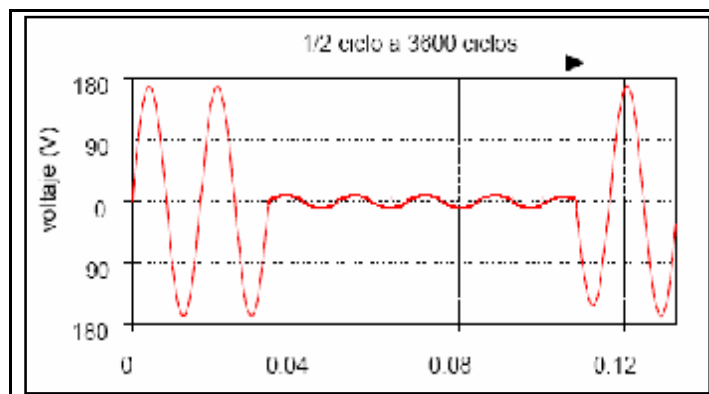


FIGURA 1.5 Interrupción

3.2.1.2 SAG de Tensión

Los SAG's de tensión, también conocidos como DIP's de Tensión, son los disturbios eléctricos más comunes.

CARACTERÍSTICAS	Son reducciones momentáneas del valor eficaz de la Tensión de 0.1 a 0.9 p.u. con una duración de 0.5 ciclos a 1 minuto.
ORIGEN	Por la entrada de grandes bloques de carga, al arranque de grandes motores o el encendido de calentadores eléctricos.
EFFECTOS	Pueden provocar la parada de equipos electro-electrónicos y la interrupción de los procesos productivos.

Algunos elementos efectivos para minimizar los problemas generados por estas reducciones súbitas de tensión son los transformadores de aislamiento y los UPS's.

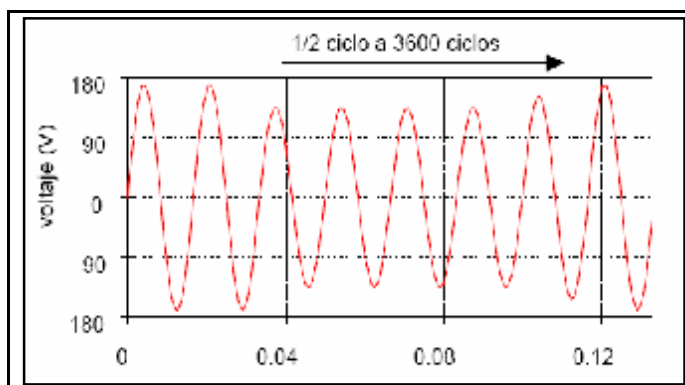


FIGURA 1.6 Depresión de Tensión (SAG)

3.2.1.3 SWELL de Tensión

CARACTERÍSTICAS	Son pequeños incrementos del valor eficaz de la tensión en el orden de 1.1 a 1.8 p.u. con una duración de 0.5 ciclos a 1 minuto.
ORIGEN	<ol style="list-style-type: none"> 1. Están asociados a condiciones de falla desequilibradas en el sistema 2. Salidas de grandes bloques de carga en circuitos con una regulación de voltaje lenta o que carezcan de la misma. 3. También causados por la entrada de Bancos de Capacitores y por el daño o pérdida de las conexiones de neutro.
EFFECTOS	Pueden causar: Degradación y falla inmediata del aislamiento de equipos y fuentes electrónicas, trastornos en los controles y controladores de estado sólido de motores (particularmente: Variadores de Velocidad), someter a esfuerzos dieléctricos los componentes de computadoras, acortando su vida útil.

Para minimizar los efectos adversos producidos por este tipo de fenómenos utilizan supresores de transitorios y UPS's, dimensionados mediante

mediciones en las instalaciones. A continuación la Figura 1.7 muestra la gráfica de Voltaje Vs. Tiempo en presencia de un SWELL.

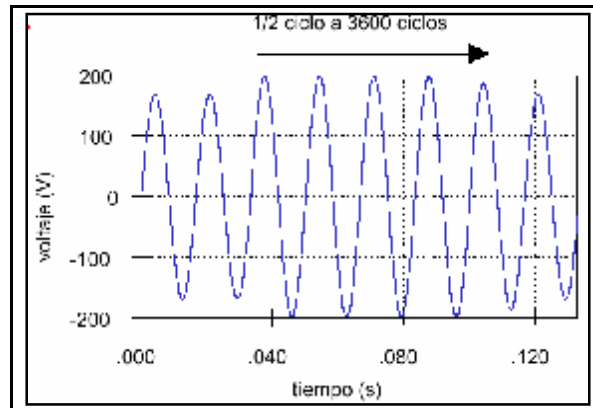


FIGURA 1.7 Incremento de Tensión (SWELL)

1.3.3 Efectos de Larga Duración

Son variaciones del valor eficaz de la tensión durante un tiempo mayor a 1 minuto, se consideran disturbios de régimen permanente y se clasifican en: [9]

- Interrupciones Sustentadas,
- Sobretensiones,
- Subtensiones, y,
- Desequilibrio de Tensión.

3.3.1.1 Interrupciones Sustentadas

CARACTERÍSTICAS	Reducción de la tensión de alimentación al valor de cero por un periodo superior a 1 minuto.
ORIGEN	Puede ser el resultado de fallas en el sistema eléctrico de los equipos. Pérdida completa de la alimentación.
EFFECTOS	Causan daño o mal funcionamiento de los equipos electrónicos.

De naturaleza permanente, requieren intervención manual para reestablecimiento de la energía eléctrica del sistema.

A continuación gráfica de Voltaje vs. Tiempo cuando ocurre una interrupción sustentada

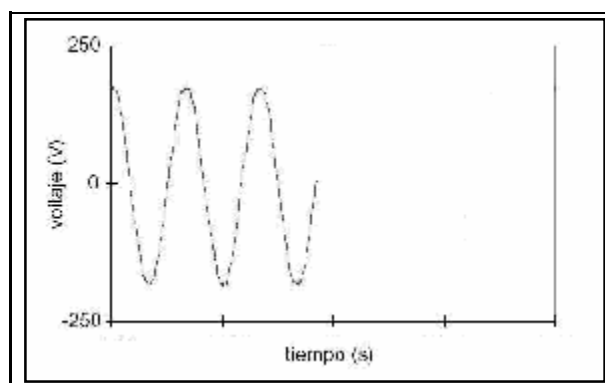


FIGURA 1.8 Interrupción sustentada

3.3.1.2 Sobretensiones

CARACTERÍSTICAS	Presentan un aumento del valor eficaz de la tensión de 1.1 a 1.2 p.u. durante un tiempo superior a 1 minuto.
ORIGEN	Se originan por la salida de grandes bloques de carga, entrada de Banco de Capacitores y ajuste incorrecto de los Taps de los Transformadores.
EFECTOS	Operación inadecuada y quema de equipos electrónicos sensibles.

A continuación la gráfica de Voltaje Vs. Tiempo en presencia de una sobretensión de tensión.

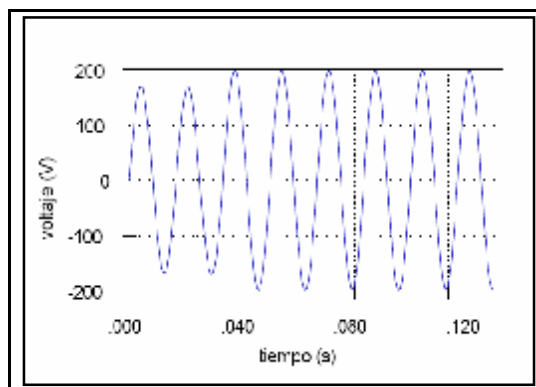


FIGURA 1.9 Sobretensión

Para minimizar el efecto de estos problemas se utiliza UPS's, Supresores de Tensión, Transformadores de acoplamiento, entre otros.

3.3.1.3 Subtensiones

CARACTERÍSTICAS	Presentan una reducción del valor eficaz de la tensión de 0.8 a 0.9 p.u. durante un tiempo superior a 1 minuto.
ORIGEN	Causados por la entrada de grandes cargas, salida de Bancos de Capacitores o por sobrecargas en los alimentadores.
EFFECTOS	Aumento en las pérdidas de los motores de inducción, parada en los dispositivos electrónicos y un mal funcionamiento en los sistemas de mando de motores.

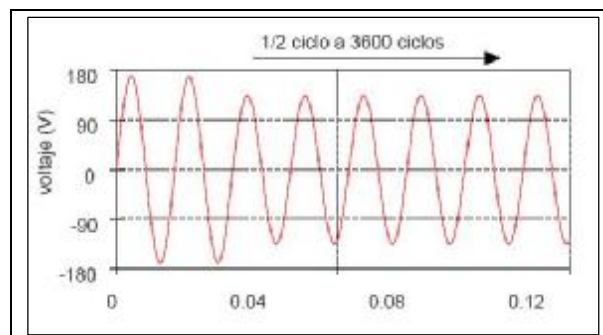


FIGURA 1.10 Subtensión

3.3.1.4 Desequilibrio de tensión

Se define como la razón entre la componente de secuencia negativa y la componente de secuencia

positiva. En el caso de la *Tensión de Secuencia Negativa*, este se presenta por el desequilibrio de carga en los sistemas de potencia.

Un desequilibrio de tensión puede ser estimado como el máximo desvío de la media de las tensiones de las tres fases dividido por la media de las tensiones y expresado en forma de porcentaje. La causa principal es la conexión de cargas monofásicas en circuitos trifásicos; anomalías en bancos de capacitores.

1.3.4 Secuenciales (Distorsión de la forma de onda)

La distorsión de la forma de onda corresponde a la deformación de su forma sinusoidal pura, y puede darse tanto en la forma de onda de tensión como en la de corriente. Se da en régimen permanente y se conocen tres tipos:

- Armónicos,
- Notch, y,
- Ruido.

1.3.4.1 Armónicos

CARACTERÍSTICAS	Deformación de la onda de su característica sinusoidal pura original por tensiones o corrientes de frecuencias múltiples de la fundamental de alimentación.
ORIGEN	Las cargas no lineales conectadas a la red son las principales causantes de armónicos, como por ejemplo: Rectificadores Monofásicos, Rectificadores Trifásicos (UPS, Drives, etc), Reguladores de Tensión, Hornos de Arco, Transformadores, entre otros.
EFFECTOS	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fallo de interruptores automáticos. 2. Operación incorrecta de contactores y relés. 3. Interferencia en sistemas de comunicación. 4. Reseteo de ordenadores y errores en PLCs. 5. Calentamiento/Destrucción de condensadores por sobretensión, cuya impedancia decrece proporcionalmente con el orden de los armónicos presentes. 6. Sobrecalentamiento/Averías en transformad. 7. Calentamiento de motores de inducción 8. Pérdidas en cobre de conductores por efecto Skin: Efecto proporcional a la frecuencia, en CA la intensidad se acumula en

	<p>los extremos del cable reduciendo su sección efectiva</p> <ol style="list-style-type: none"> 9. Pérdidas dieléctricas en condensadores 10. Intensidades en conductores de neutro, incluso en redes equilibradas producido por los armónicos triples (3, 6, 9, 12, ...) 11. Errores de medición de energía activa, reactiva y factor de potencia. 12. Lecturas erróneas con multímetros basados en el valor medio o con poco ancho de banda. 13. La elevación de sólo 10°C de la temperatura máxima del aislamiento de un conductor reduce a la mitad su vida útil. 14. Un aumento del 10% de la tensión máxima del dieléctrico de un condensador reduce a la mitad su vida útil.
--	---

Esta perturbación corresponde a una de las más frecuentes en la actualidad, por lo que es de nuestro particular interés y se analizará con mayor detalle.

La Figura 1.12 muestra una onda sinusoidal fundamental con su tercer y quinto armónicos, es decir, para una frecuencia fundamental de 60 Hz, el

tercer armónico tendría 180 Hz y el quinto armónico 300 Hz. [6]

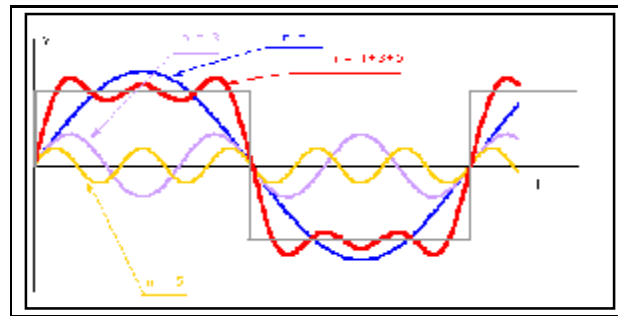


FIGURA 1.11 Gráfica de Armónicos

El problema de presencia de armónicos en un sistema requiere una consideración especial, ya que no se pueden sacar conclusiones útiles sin conocer el espectro de las corrientes armónicas presentes, pero dada la complejidad es común usar como referencia los valores correspondientes a la Distorsión Armónica Total (THD).

Distorsión Armónica Total (THD): Es la relación de las armónicas con respecto a la fundamental que indica la variación que tiene la onda que se está midiendo con respecto de la onda fundamental que se quiere,

es decir, proporciona cuánto se ha "distorsionado" la onda sinusoidal en el proceso. [7]

Se calcula la THD del Voltaje (en porcentaje):

$$THD\%(U) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=50} U_n^2}}{U_1} 100 \quad (1.1)$$

Se calcula la THD de la Corriente (en porcentaje):

$$THD\%(I) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=50} I_n^2}}{I_1} 100 \quad (1.2)$$

Existen diversas medidas para reducir la presencia de armónicos y sus efectos en un sistema, entre las que están:

Filtros Pasivos: Establecen un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas de forma que circulen por el filtro y no por la fuente de alimentación.

Transformadores de separación: separan los armónicos triple-N de la fuente de alimentación.

Filtros Activos: compensa la corriente armónica y sólo la corriente fundamental procede de la fuente de alimentación.

1.3.4.1 Notch (“Muesca”, Corte)

CARACTERÍSTICAS	Perturbación de la forma de onda normal de tensión, dura menos de 0.5 ciclos y de polaridad opuesta (se substraee de la forma de onda).
ORIGEN	Causado por conmutadores electrónicos (convertidores, rectificadores), que durante la conmutación provocan un cortocircuito entre fases, incitando un incremento de corriente y una disminución del voltaje. También es causado por acondicionadores de energía (UPS, estabilizadores de voltaje).
EFFECTOS	Usualmente no suele ser un problema mayor, pero puede causar que equipos, especialmente electrónicos, operen incorrectamente provocando errores en el procesamiento y pérdida de información.

A continuación la gráfica de Voltaje Vs. Tiempo cuando es afectado por un Notch de tensión. [9]

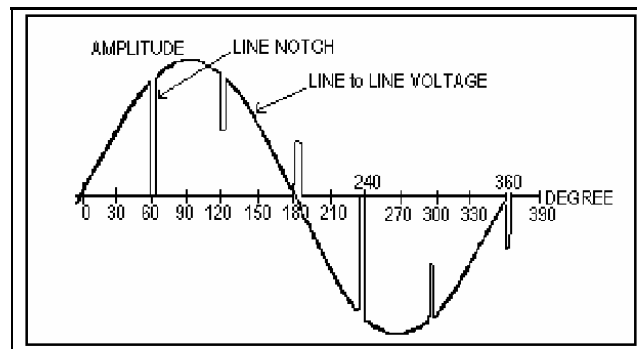


FIGURA 1.12 Notch de tensión

1.3.4.2 Ruido

CARACTERÍSTICAS	Distorsión de alta frecuencia en la forma de onda, menor que 200 kHz, de baja intensidad, superpuesto a la corriente o tensión en los conductores de fase, o en los de neutro.
ORIGEN	Resulta de operaciones defectuosas, de equipos e instalaciones de componentes inadecuados en el sistema (soldadoras eléctricas, etc.) tanto por las empresas suministradoras como por los usuarios, y por los aterrizamientos impropios.
EFEKTOS	Frecuentemente pasa desapercibido, pero puede causar mal funcionamiento en equipos electrónicos, errores en la electrónica digital, corrupción de datos, sobrecalentamiento, distorsión de señales y desgaste en general

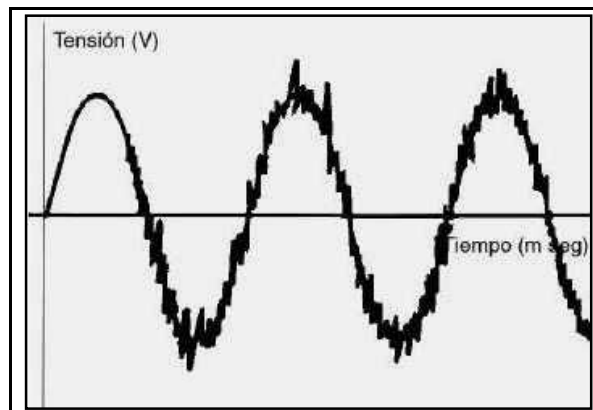


FIGURA 1.13 Ruido en una Señal Tensión

Para efectuar mediciones se debe usar un buen Analizador de Espectro con una banda lo suficientemente amplia, de modo que permita detectar niveles de ruido por encima de los índices aceptables y tomar acciones correctivas instalando equipos tales como: Transformadores de Aislamiento, Reguladores Ferro-Resonantes, UPS, entre otros. [8]

1.3.5 Fluctuaciones de Tensión

Las fluctuaciones de tensión, entre las que destaca el Parpadeo (Flicker), constituyen uno de los mayores problemas de regulación de tensión en la industria.

Son variaciones sistemáticas del perfil de la tensión o una serie de variaciones aleatorias de la magnitud de la tensión, las cuales exceden el límite especificado de 0,95 a 1,05 [p.u.].

1.3.5.1 Flicker (Parpadeo)

CARACTERÍSTICAS	Variación del valor eficaz o amplitud de la tensión en un rango menor al 10% del valor nominal. Ocurre en un rango de frecuencia de 0.5 a 25 Hz.
ORIGEN	Se originan cuando el valor de la potencia de Cortocircuito es menor que el de las cargas fluctuantes. Algunas de las grandes fuentes industriales de este tipo de fluctuación son: Hornos de Arco, Soldadoras Eléctricas, Motores con cargas alternativas y arranques múltiples, etc.
EFFECTOS	Produce fluctuación de flujo luminoso en lámparas, induciendo la impresión de inestabilidad en la sensación visual. Pueden afectar el funcionamiento de equipos sensibles (sin llegar a daños irreparables), como lo son: Sistemas Digitales de Control, Electromedicina, PLC, Instrumentación, etc.

La Figura 1.14 muestra la variación del Voltaje en el tiempo en presencia de un Flicker. [10]

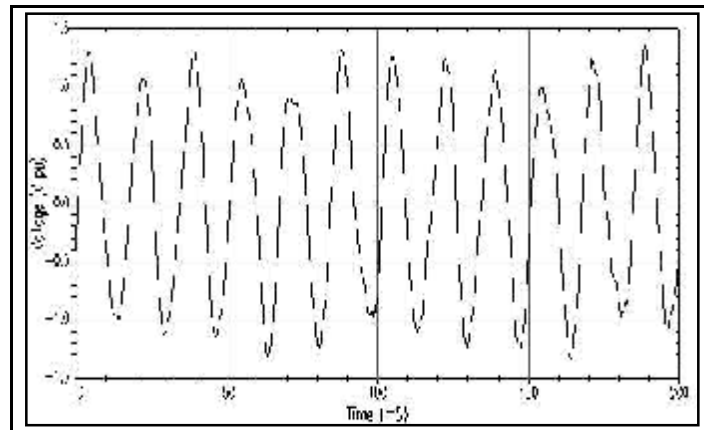


FIGURA 1.14 Flicker

1.4 Compensadores de Calidad de Energía

Como se ha mencionado el incremento de la automatización en la industria moderna ha cambiado los requerimientos de la Calidad de Energía. Las computadoras, equipos de control de procesos y convertidores son sensibles a las desviaciones de los voltajes de línea de su forma sinusoidal ideal, tales como los SAGs, Armónicos, Flickers, e Interrupciones de Alimentación.

En base a lo expuesto los equipos convencionales ya no son una alternativa de solución, debiendo introducirse al Mercado equipos basados en convertidores PWM conectados en serie o paralelo, almacenadores de energía, entre los que destacan:

- Distribution Static Compensator (DSTATCOM)
- Dynamic Voltage Restorer (DVR)
- Uninterruptible Power Supply (UPS)

1.4.1 Distributed Static Compensator (DSTATCOM)

Consiste en un convertidor de voltaje/compensador conectado en paralelo a la red de distribución a través de un transformador de acoplamiento, lo que permite al dispositivo absorber o generar potencia activa y reactiva de forma controlada.

El DSTATCOM es utilizado mayormente para la regulación de voltaje (protección contra SAGs y SWELLS), corrección del Factor de Potencia y eliminación de Corrientes Armónicas. También protege el sistema de distribución de los Flickers y mitiga armónicos, inyectando armónicos de corriente a la cargas para que la corriente de línea sea sinusoidal, corrigiendo el desbalance en las corrientes de línea. No provee compensación durante interrupciones completas de potencia. [11]

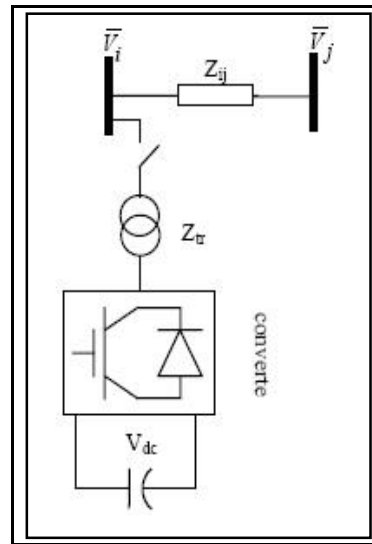


FIGURA 1.15 Esquema de un DSTATCOM



FIGURA 1.16 Foto de un DSTATCOM de marca PureWave

1.4.2 Dynamic Voltage Restorer (DVR)

Consiste en un Convertidor de Voltaje/Compensador conector en serie a la red de distribución a través de un

transformador de acoplamiento. En general se lo usa para la protección de cargas críticas y sensibles contra depresiones y sobretensiones de voltaje de corta duración (SAGs y SWELLS), así como también para eliminar voltajes armónicos. Se considera que entra en operación únicamente durante períodos de falla reaccionando de manera instantánea ante SAGs y SWELLS de tensión. Al igual que el DSTATCOM no provee compensación durante interrupciones completas de potencia.

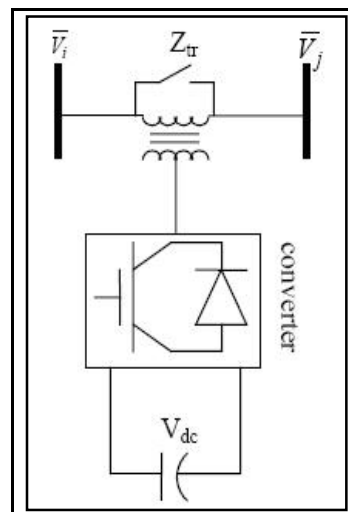


FIGURA 1.17 Esquema de un DVR

En el caso del DVR, es posible construirlo para potencias relativamente altas, ampliando su utilización a todas las

ramas de la industria, desde líneas de producción y fábricas enteras hasta incluso polígonos industriales. [11]



FIGURA 1.18 Foto de un DVR de marca PureWave

1.4.3 Uninterruptible Power Supply (UPS)

Se trata de un Convertidor de Voltaje que proporciona una alimentación continua para proteger cargas sensibles que se alimentan de una sola fuente de energía, eliminando a su vez casi todos los problemas relacionados con la Calidad de Energía. [11]

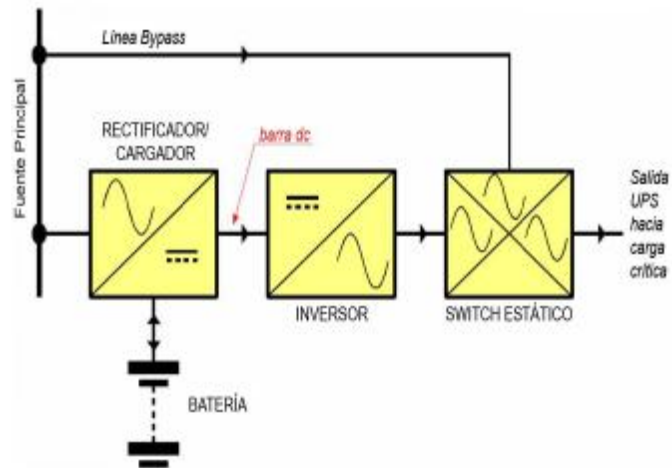


FIGURA 1.19 UPS ON-LINE



FIGURA 1.20 Foto de un UPS de marca PureWave

1.4.4 Análisis de aplicación de los Compensadores

La adecuada selección del compensador se basa en:

- Tipo de carga a proteger: Qué tan sensible es la carga y su nivel de importancia dentro del proceso.

- Problemas de Calidad de Energía presentes en el sistema:
No todos los compensadores fueron diseñados para resolver los mismos problemas
- Inversión: Ciertos problemas de calidad de energía son corregidos por más de un compensador, por lo que la elección está sujeta a los otros beneficios que trae el equipo y que implican una mayor inversión.

La tabla 1.2 resume las correcciones que los compensadores realizan a los diferentes problemas de calidad de energía:

Problemas de Calidad de Energía	COMPENSADORES		
	DSTATCOM	DVR	UPS
Caidas de Tensión		X	X
Interrupciones			X
Elevaciones pasajeras de Tensión		X	X
Fenómenos Transitorios	X	X	
Sobretensiones	X		X
Subtensiones	X		X
Armónicos		X	
Notch			
Fluctuaciones de tensión	X	X	

TABLA 1.2 Comparación de los Compensadores según los problemas de Calidad de Energía que corrigen.

CAPÍTULO 2

2. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ININTERRUMPIDA (UPS).

Históricamente, los generadores de emergencia han sido la solución para proteger las cargas sensibles de la interrupción del servicio suministrador de energía. Sin embargo, en la actualidad, éstos resultan ineficientes ante equipos altamente sensibles que en presencia de una interrupción alteran su funcionamiento sin dar tiempo a que el generador entre en operación.

Ante este problema, se buscó eliminar estos disturbios de las redes eléctricas y gracias al desarrollo de la Electrónica de Potencia se diseñó e implementó equipos compensadores de interrupciones de tensión llamados Sistemas o Fuentes de Alimentación Ininterrumpida (SAI - ó UPS/Uninterruptable Power Supply).

2.1. Historia de los UPS

La producción en masa de los UPS, como equipo para mitigar problemas por calidad de energía, se dio por primera vez en el Mercado en los años 1970's, esencialmente para resolver la necesidad de grandes sistemas computacionales, de modo que garantizaran continuidad y calidad en la fuente de alimentación eléctrica.

Eventualmente, y al comprobarse su funcionalidad, los modelos de UPS fueron evolucionando para extender su utilización al gran número de cargas altamente sensibles desarrolladas y a su diversificación dada en ese entonces, por la explosión de la tecnología digital. Como resultado, los UPS se modificaron hasta satisfacer las necesidades de aplicaciones tan complejas como las de las mini y micro computadoras, junto con otros dispositivos electrónicos que, como parte de procesos industriales automatizados, de instrumentación y telecomunicaciones, no toleran problemas de calidad de energía, tales como SWELL's, SAG's e interrupciones. Estos dos últimos, los de mayor importancia, por la frecuencia con que se presentan (el 98% de los problemas guardan relación con los SAG's de Tensión e

interrupciones con una duración de menos de 15 segundos). De ahí la importancia en la utilización de UPS's en casos en los que inclusive se puede prescindir del uso de un generador de emergencia.

Debido a la rapidez de cambio sufrido por el mercado la adaptación hizo necesaria una serie de innovaciones tecnológicas y una extensión de los rangos de potencia, por lo que el progreso se hizo en ambas direcciones, hacia bajas y altas potencias, solucionando las necesidades respectivas de los microordenadores y las aplicaciones vitales de Sistemas de la Telecomunicación Digital. Esa es la razón por la que el término UPS comprende una gran variedad de productos que abarcan desde unos pocos cientos hasta varios mega Voltios-Amperios (VA). [12]

2.2. Definición y Funcionamiento de un UPS

Los sistemas de Alimentación Ininterrumpida (UPS) son dispositivos compensadores de tensión gracias a una fuente DC con la que pueden proporcionar energía AC a la red o a la carga. La propuesta nace del estudio de convertidores de DC a AC,

donde se pensó en utilizar el concepto de convertidores para alimentar una línea que presenta una falla de interrupción de tensión.

El funcionamiento de un UPS se divide en tres etapas principales:

- **BATERÍA:** Almacenar energía mientras hay voltaje en la línea para en el evento de una pérdida en la alimentación poder compensar la energía.
- **CONVERTIDOR DC-AC:** También llamado Inversor, cambia el voltaje de la batería en un voltaje AC, el cual va a ser recibido por la carga del sistema.
- **CONVERTIDOR AC-DC:** También llamado Rectificador, es el responsable de la recarga de la batería.

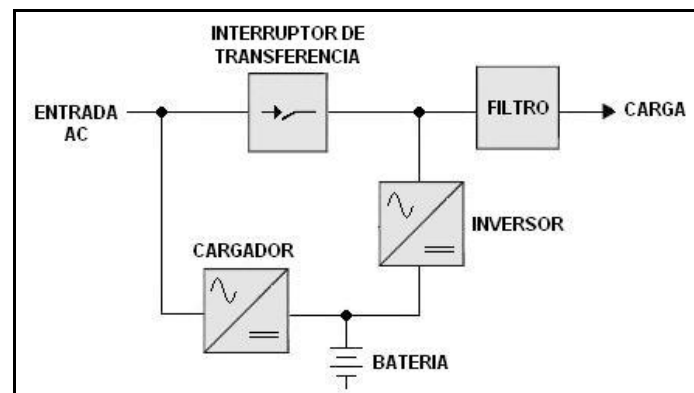


FIGURA 2.1: Diagrama Básico de un UPS

2.3. Topologías de los UPS

Durante el proceso de adaptación y cambio, las técnicas empleadas para el desarrollo y mejora de los UPS se volvieron muy diversas, dependiendo del tipo de protección a aplicar, lo crítico de la carga y su nivel de potencia, diversificando su identificación en el mercado. De igual forma la descripción seleccionada para calificar los tipos de UPS se volvió confusa.

Por esta razón la IEC (International Electrotechnical Commission) creó estándares para los diferentes tipos de UPS y los métodos usados para la medición de su operación, estabilizando su clasificación. Esta estabilización fue adoptada por el CENELEC (European Standardization Committee), por lo que se crearon las normas **IEC 62040-3** y su equivalente europea **ENV 50091-3**, las que claramente definen tres tipos de UPS: [12][13]

- Pasivo Standby (OFF LINE)
- Linea-Interactiva
- Doble Conversión (ON LINE)

Una vez definida la identificación apropiada de las diferentes topologías de UPS se indica la naturaleza básica de su diseño. Los fabricantes producen modelos con diseños o topologías similares, pero con características de desempeño muy diferentes, entre los más utilizados en la industria están: Standby, Standby-Ferro, Línea Interactiva, Doble Conversión Online y Delta Conversión Online.

2.3.1. UPS Standby

En 1980's, los tipos de cargas y los rangos de potencias incrementaron substancialmente y se desarrolló el UPS "Off – Line", el término corresponde al contrario a "On – Line". La topología de este tipo de UPS se ilustra en la Figura 2.2 e incluye un filtro cuya función no está claramente definida, y ocasionalmente se presenta como un regulador de voltaje. Básicamente consiste en un inversor conectado en paralelo a la línea de alimentación AC, conformando así una configuración Pasiva - Stand by (no es continua), donde el interruptor de transferencia está regulado para elegir entre la entrada AC filtrada, la cual es la fuente de energía primaria (dibujo en línea sólida), y la batería/inversor, siempre que la

fuente de energía primaria falle. Por definición, el tiempo de transferencia para la operación del inversor es de aproximadamente cinco milisegundos. Esto significa una pérdida de energía en su salida la cual se considera insignificante para la mayoría de las cargas, pero para cargas críticas o sensibles esto es un tiempo considerablemente largo, por lo que no se recomienda su utilización en este tipo de cargas.

En conclusión este tipo de UPS provee un nivel de protección básico y elimina ciertos problemas de la red eléctrica con cierto grado de intensidad. Típicamente están diseñados para un rango de capacidades que oscila entre los 300 VA a los 2000 VA. El UPS Standby es el más utilizado para Computadoras Personales.

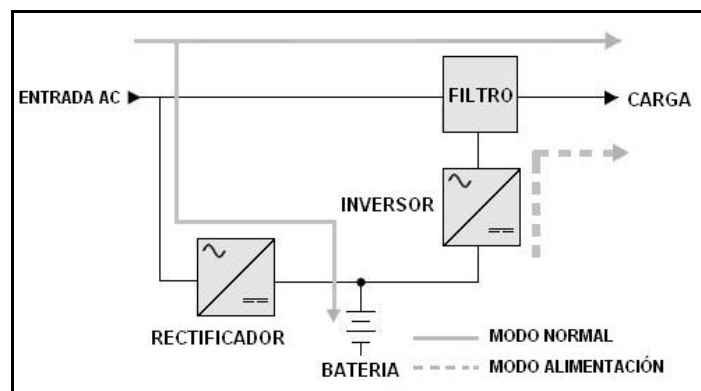


FIGURA 2.2: Diagrama UPS STAND BY

2.3.2. UPS Stand By Ferro

Este diseño depende de un transformador de saturación especial conformado por tres devanados (conexiones de energía). Su modo de operación es similar al de Stand By con la diferencia de que el transformador tiene una capacidad especial “Ferro-resonante”, la cual provee regulación de voltaje limitado y una salida con un pequeño rizado. [12][13]

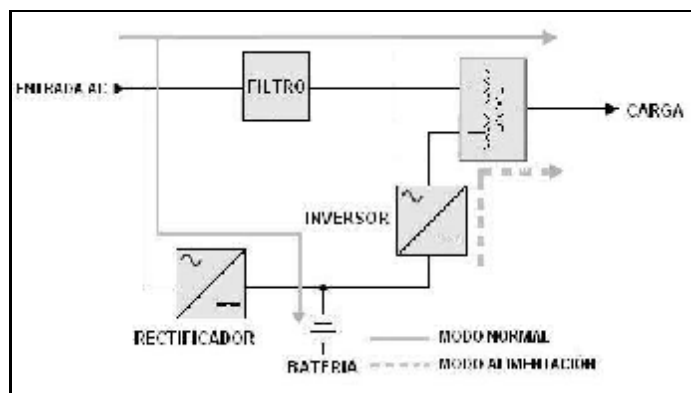


Figura 2.3: UPS Standby-Ferro

2.3.3. UPS Línea Interactiva

Los UPS de Línea Interactiva tienen un modo de operación bastante similar a los Stand By con la diferencia de que continuamente están monitoreando el voltaje de la red eléctrica comercial y lo acondicionan de tal manera que la

carga recibe un voltaje regulado. Dicho acondicionamiento no protege de todos los problemas que existen en la red eléctrica, por lo tanto, brinda un nivel intermedio de protección (cercano al 85%).

El UPS de Línea Interactiva, ilustrado en la figura 2.3, muestra que el convertidor operando en su modo inversor, siempre está conectado a la salida del UPS. Cuando el servicio de energía falla o existe un problema por un voltaje variante fuera del rango de tolerancia, el interruptor de transferencia se abre y la energía fluye desde la batería a la salida del UPS a través del convertidor. El valor de la transferencia o conmutación es menor a los 5 ms.

Además, el diseño de Línea Interactiva usualmente incorpora un regulador de voltaje, el cual puede ser una tarjeta electrónica o un transformador con taps (tap-changing), de modo que mientras el voltaje de la red comercial va cambiando, los taps automáticamente van variando con el fin de regular el voltaje de salida ajustando la corriente de salida a medida que el voltaje de entrada varía. Esta tecnología es sumamente importante, ya que

cuando existe una condición de bajo voltaje a la entrada, el UPS regula el voltaje y así se evita la transferencia a la batería, prolongando su tiempo de vida, ya que su uso frecuente podría causar fallas prematuras en la misma. De todos modos, el convertidor también puede ser diseñado de manera tal que si falla la batería, permita el flujo de energía de la entrada AC a la salida.

Como características principales del UPS Línea Interactiva tenemos: Alta eficiencia, pequeño tamaño, bajo costo y alta confiabilidad, junto con la habilidad de corregir condiciones de voltaje de líneas bajas o altas. Es el tipo dominante de UPS en rangos de energía de 500 VA a 5000 VA. Es el diseño más comúnmente utilizado para pequeños negocios, Web y servidores departamentales.

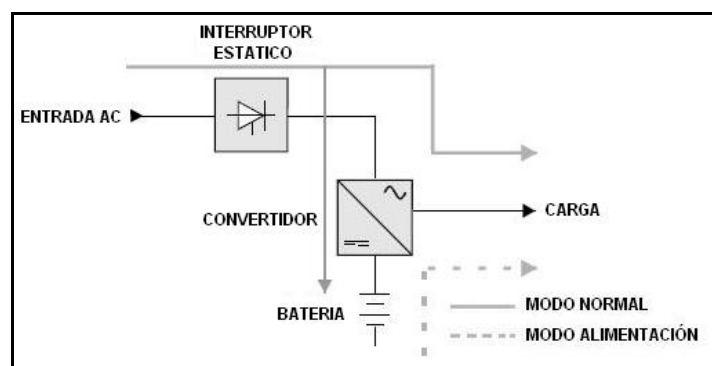


FIGURA 2.4: Diagrama UPS Línea Interactiva

2.3.4. UPS de Doble Conversión Online

Este es el UPS más utilizado sobre 10kVA, también llamado “On Line” debido a que el Inversor se encuentra dentro de la línea principal de energía operando en todo momento. El diagrama de bloques de este tipo se ilustra en la Figura 2.5 y es muy similar al de standby, excepto que el paso de la energía primaria es a través del convertidor. Esta tecnología es la más cara de todas por ser la que ofrece el mayor nivel de protección.

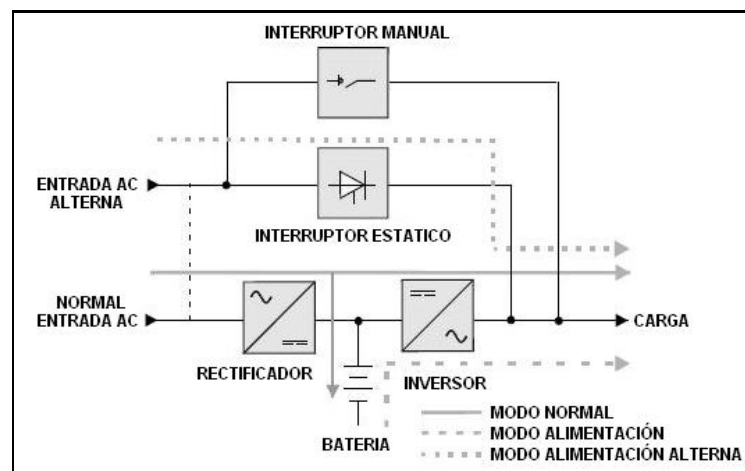


FIGURA 2.5: Diagrama UPS Doble Conversión Online

Una característica importante de esta topología es la doble conversión, la cual consiste en convertir la energía de

entrada alterna en corriente directa y posteriormente en corriente alterna. De esta manera se logra recargar el banco de baterías a la vez que se eliminan la gran mayoría de disturbios encontrados en la línea eléctrica comercial, disponiendo así de una salida sinusoidal pura y limpia.

En este diseño, una falla en la entrada AC no activa el interruptor de transferencia debido a que está cargando la batería constantemente, de modo que pueda proveer de energía al convertidor de salida. Es importante resaltar que los UPS On Line no presentan caídas de voltaje o tiempos de transferencia asociada con la transferencia del inversor. Solo en caso de falla o mantenimiento el UPS transfiere la carga a la línea comercial (Bypass).

La etapa rectificadora que carga la batería y la inversora que alimenta la carga total, reducen la eficiencia del convertidor y aumentan la generación de calor asociado y, debido al constante funcionamiento de todos los componentes de energía se reduce la confiabilidad en relación a los otros diseños. La energía consumida es una parte significativa del costo del ciclo de vida del UPS.

El UPS On Line se presenta como la mejor alternativa en cuanto a calidad de equipo porque la carga siempre está siendo alimentada por el Inversor, estabilizando el voltaje permanentemente, la frecuencia también permanece estable y la forma de onda es sinusoidal. Por lo anteriormente expuesto esta tecnología es apropiada para un gran número de computadoras, grupos de servidores, sistemas automatizados y aplicaciones estratégicas e industriales. Estos UPS se diseñan en un rango de capacidades de 700 VA hasta 4.5 MVA.

2.3.5. UPS Delta Conversión Online

Éste UPS, es uno de los más modernos y fue introducido para eliminar los inconvenientes del diseño de Doble Conversión On-Line y está disponible en rangos desde 5kVA a 1,6MVA. Opera de forma similar al diseño de Doble Conversión On Line, con el convertidor suministrando voltaje a la carga todo el tiempo con el distintivo de aportar energía al convertidor de salida, aumentando la eficiencia.

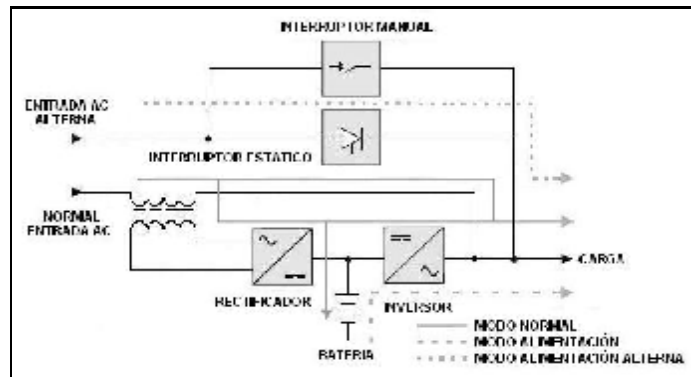


FIGURA 2.6: Diagrama UPS Delta Conversión Online

2.3.6. Aplicaciones de las Topologías

La elección de un modelo de topología específica de UPS para determinada aplicación dependerá de las características de cada uno. Como atributos principales de las topologías de UPS podríamos citar: la eficiencia, la calidad de implementación y fabricación, los rangos de operación, y los atributos de diseño. A continuación una tabla que resume los atributos Vs. Las topologías.

TOPOLOGÍA	Rango de Operación (kVA)	Costo por VA	Eficiencia	Convertor siempre operando
Stand By	0,3 - 2	Bajo	Medio	No
Stand By Ferro	3 - 15	Alto	Bajo - Medio	No
Línea Interactiva	0,5 - 5	Medio	Muy alto	Depende del diseño
Doble Conversión On-Line	0,7 - 4,500	Medio	Alto	Si
Conversión Delta On-Line	5 - 1600	Medio	Alto	Si

TABLA 2.1: Tabla comparativa de los atributos de diseño Vs. topologías de los UPS

La selección del UPS adecuado está sujeta a sus atributos y principalmente al tipo de carga que se desea proteger, para lo cual se presenta a continuación una tabla que resume las posibles aplicaciones.

APLICACIONES DE LAS TOPOLOGIAS DE UPS	
STAND BY	1 Computadoras para el Hogar
	2 Video Juegos
	3 Mini - Computadoras
	4 Cualquier otra aplicación que no sea crítica
LINEA INTERACTIVA	1 Computadoras Personales
	2 Conmutadores
	3 Servidores de rango medio
	4 Hubs
	5 Switches
DOBLE CONVERSION	1 Equipos de Telecomunicaciones
	2 Sevidores
	3 Equipo Hospitalario
	4 Centro de Cómputos
	5 Redes de Informática
	6 Cargas Críticas en General

TABLA 2.2: Aplicaciones de las Topologías de UPS

2.3.6.1. Ventajas y Desventajas

STAND BY	VENTAJAS
	1 Tamaño Compacto, fácil de colocar en cualquier lugar.
	2 Posee un diseño simple, lo que facilita su reparación.
	3 Su costo es bajo.
DESVENTAJAS	
1 No brinda un aislamiento real de la red eléctrica comercial.	
2 No provee regulación en la frecuencia de salida ni en la línea.	
3 El tiempo de intercambio de la red a batería es considerablemente largo y para cargas altamente sensitivas esto es suficiente para que se apaguen.	

TABLA 2.3: Ventajas y desventajas del UPS – Stand By

<u>LINEA INTERACTIVA</u>	VENTAJAS	
	1	Provee una regulación constante de voltaje a la salida.
	2	Excelente relación costo - beneficio.
	DESVENTAJAS	
	1	No brinda un aislamiento real de la red eléctrica comercial.
	2	No provee regulación de frecuencia de salida.
3	No filtra armónicos.	
4	Eficiencia muy baja cuando trabaja con cargas muy bajas.	

TABLA 2.4: Ventajas y desventajas del UPS – Línea Interactiva

<u>DOBLE CONVERSION</u>	VENTAJAS	
	1	Provee un aislamiento total de la carga con respecto a la red eléctrica comercial.
	2	Posee un amplio rango de voltaje a la entrada.
	3	Provee regulación de voltaje a la salida.
	4	Provee regulación de frecuencia a la salida.
	5	Provee una onda sinusoidal pura a la salida.
	6	Provee un tiempo de transferencia igual a cero, lo cual permite una alimentación continua hacia la carga.
	7	Elimina los problemas de armónicos.
	8	Elimina en un 99% los problemas de la red eléctrica.
	9	Altamente eficiente cuando trabaja con cargas no lineales.
	10	Posee un bypass manual, diseñado para facilitar el mantenimiento.
DESVENTAJAS		
1	Posee un precio relativamente elevado, pero es compensado por sus numerosas ventajas.	

TABLA 2.5: Ventajas y desventajas del UPS – Doble Conversión

La comparación entre las tres topologías principales muestra que el de Doble Conversión ofrece muchas más ventajas debido principalmente a la posición del UPS conectado en serie con la carga. Además, este modelo no tiene mayores desventajas, salvo su elevado costo, el que no es comparable con la cantidad de beneficios que ofrece, volviéndose indispensable para cargas cuya naturaleza es

crítica. Por lo anteriormente expuesto los tres tipos de UPS se emplean a bajas potencias (menores a 2KVA), sin embargo para potencias mayores se recomienda el uso del de Doble Conversión.

Entre las ventajas y desventajas que tienen las diferentes topologías se encuentran también los problemas de Calidad de Energía que mitigan. A continuación las gráficas porcentuales de los principales problemas en la red eléctrica y la efectividad de cada una de las topologías ante los mismos.

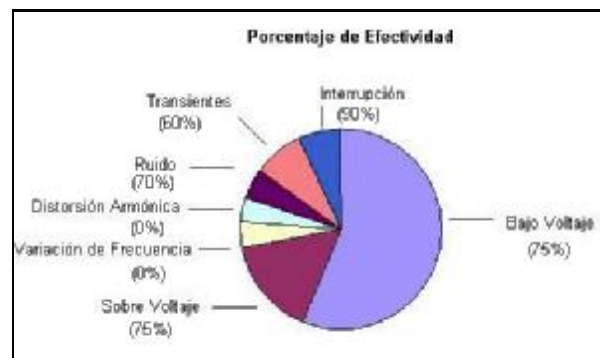


FIGURA 2.7: Efectividad vs. Frecuencia de Problemas de Calidad de Energía UPS – Stand By

Los porcentajes de la Fig. 2.7 corresponden a valores promedio, ya que la ventana de protección de esta topología contra los problemas eléctricos de

la red oscila entre el 60 – 70 % dependiendo del modelo y fabricante.

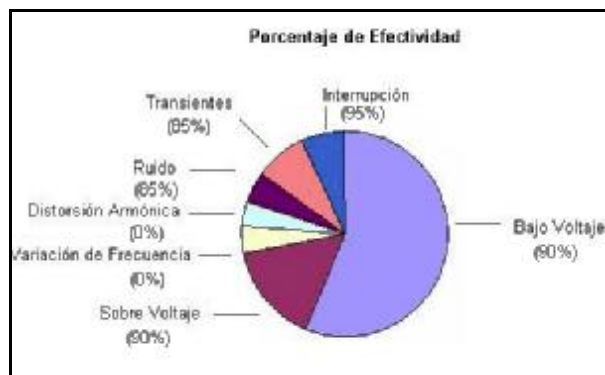


FIGURA 2.8: Efectividad vs. Frecuencia de Problemas de Calidad de Energía UPS – Línea Interactiva

Los porcentajes de la Fig. 2.8 corresponden a valores promedio, ya que la ventana de protección de esta topología contra los problemas eléctricos de la red oscila entre el 80 – 85 % dependiendo del modelo y fabricante. [14]



FIGURA 2.9: Efectividad vs. Frecuencia de Problemas de Calidad de Energía UPS – Doble Conversión

2.4. Selección de la Topología a utilizar

Una vez explicadas todos los tipos de Topologías, sus características, ventajas y desventajas; las diferencias son notables, por lo que es importante su consideración al momento de seleccionar un modelo. Por lo tanto, existen diversos factores que de acuerdo a su importancia se deben tomar en cuenta al momento de la selección de una topología en especial. En orden de importancia:

1. Naturaleza de la carga y consumo: Qué tan sensible es la carga y qué tan crítica es la continuidad de su funcionamiento.
2. Los problemas a mitigar: Qué problemas de calidad de Energía se presentan en la red.
3. Costo: Cuánto se está dispuesto a invertir para solucionar el problema.

2.5. UPS Línea Interactiva

Para este proyecto se ha escogido para su diseño un UPS de configuración de Línea Interactiva.

2.5.1. Principio de Funcionamiento

En el literal 2.3.3 se estudio la topología del UPS de Línea Interactiva, revisando sus características principales y sus componentes. Su modo de operación se divide en tres etapas principales de funcionamiento: [15]

ETAPA 1: Operación Fuera de Línea

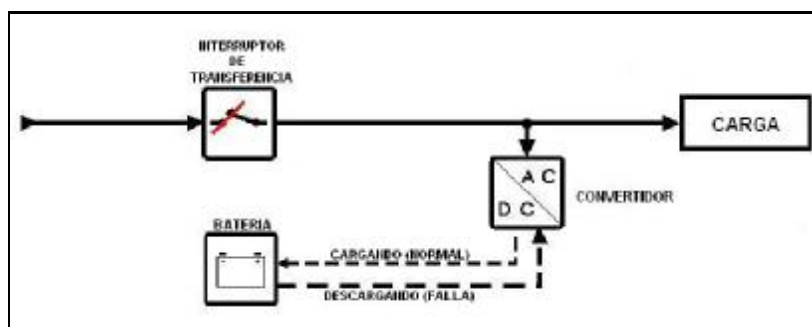


FIGURA 2.10 UPS Línea Interactiva – Operación Normal

ETAPA 2: Operación en presencia de Fallas (Interrupciones)

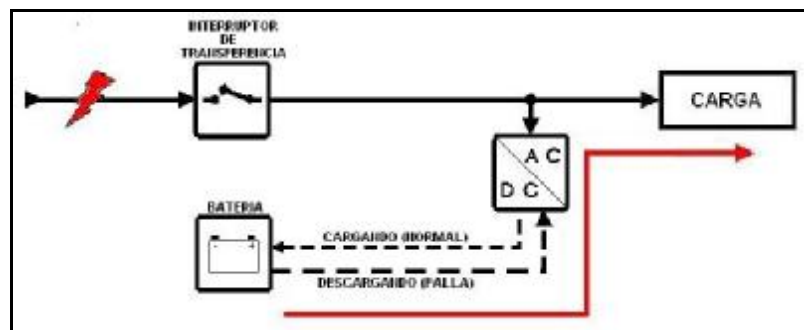


FIGURA 2.11. UPS Línea Interactiva – Operación en Falla

La alimentación a la carga llega a través del convertidor transfiriendo la energía de la batería. Para esto el convertidor opera en MODO INVERSOR (DC / AC).

ETAPA 3: Recarga de la Batería

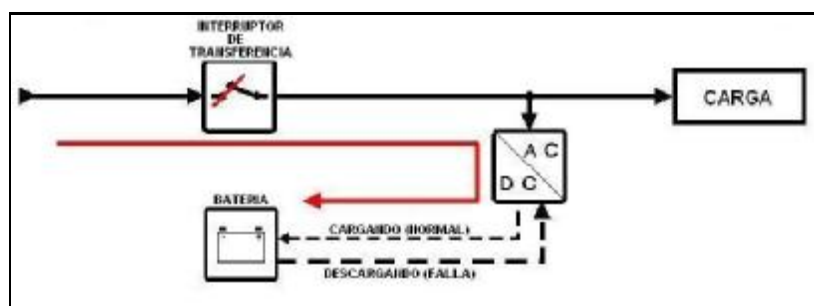


FIGURA 2.12: UPS Línea Interactiva – Recarga de Batería

La alimentación a la carga llega directo de la red comercial, y a su vez se recarga la batería a través del convertidor operando en MODO RECTIFICADOR (AC / DC).

La ETAPA 2 varía de acuerdo al diseño de control para la regulación de voltaje. De modo que en presencia de un SAG o SWELL de tensión el convertidor se encarga de su debida compensación usando los dos modos de operación.

Se debe resaltar que este tipo de UPS presenta las siguientes características:

- Monitoreo y acondicionamiento continuo del voltaje de la red eléctrica comercial, regulando la alimentación de la carga.
- Corrige del 80 al 85% de los problemas existentes de Calidad de Energía: Sags y Swells de tensión, Transientes e Interrupciones. (Figura 2.8).
- Tiempo de Conmutación menor a 5ms
- Rangos de operación de 500VA hasta 5000VA

2.5.2. Ventajas y Desventajas

Las ventajas y desventajas de esta topología se resumen en la tabla 2.4 y en la Figura 2.7, por lo que para este punto realizaremos un análisis comparativo entre el UPS de Línea Interactiva y el de Doble Conversión, por ser este último el de mayor eficiencia en la compensación de problemas de calidad de energía: [13]

	UPS LÍNEA INTERACTIVA	UPS DOBLE CONVERSIÓN
CONSTRUCCIÓN INTERNA	SENCILLA	COMPLEJA
COSTO	BAJO	ALTO
TAMAÑO	PEQUEÑO	GRANDE
MANTENIMIENTO	OCASIONAL (Batería)	CONSTANTE (Convertidor)
TIEMPO DE TRANSFERENCIA	< 5ms	0ms
TIPO DE CARGA	CARGAS NORMALES	CARGAS SENSIBLES
FACTOR DE POTENCIA	CORRECCIÓN	CORRECCIÓN
EFICIENCIA	ALTA	MEDIA

TABLA 2.6: Diferencias UPS Línea Interactiva y Doble Conversión

2.5.3. Etapas de Operación

Como se ha mencionado en los párrafos precedentes, el UPS de Línea Interactiva basa su funcionamiento en un Convertidor que opera en dos etapas:

- MODO INVERSOR (Figura 2.11)
- MODO RECTIFICADOR (Figura 2.12)

2.5.3.1. Etapa Inversora

El principal propósito de ésta etapa es la de proveer un voltaje de salida AC a partir de una fuente de poder DC. En esta etapa la amplitud, fase y frecuencia deben ser controlables, con el fin de

obtener una adecuada tensión de salida AC para alimentar la carga que se protegerá.

La figura 2.13 muestra la estructura básica de cada uno de los componentes que conforman la etapa inversora:

- Fuente DC: Formado por bancos de Baterías, puede estar acompañada de capacitores para filtrar la señal.
- Interruptores Estáticos (Compuertas): Tenemos varias opciones según su velocidad de conmutación y potencia. Entre ellos tenemos a los SCR, GTO, IGBT y MOSFET.
- Carga

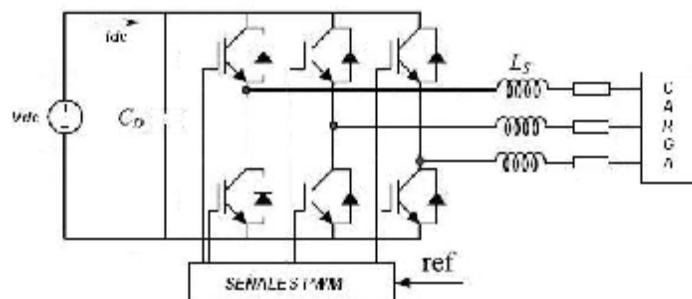


FIGURA 2.13. Estructura Inversor

Según se definan los disparos para el control de encendido y apagado de los Interruptores, éstos operarán de tal forma que generen a la salida un voltaje AC regulado tanto como el diseño lo permita.

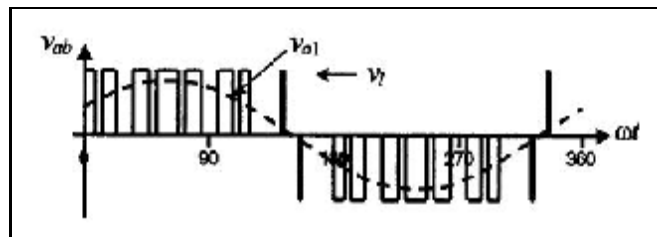


FIGURA 2.14. Salida del Inversor

En la Figura 2.14 se muestra el Voltaje V_{ab} generado por el Inverter a partir de una señal PWM que comande la conmutación de los Interruptores.

2.5.3.2. Etapa Rectificadora

Como se mencionó antes el convertidor puede funcionar tanto como Inversor o Rectificador, lo que los diferencia es el control para la conmutación de los Interruptores, siendo el propósito de esta etapa el convertir una Señal AC a una DC para recargar la Batería.

La Fig. 2.15 muestra un Rectificador, donde la estructura es la misma, cambiando solamente el sentido de la corriente y la Fig. 2.16 muestra la señal de voltaje Rectificada.

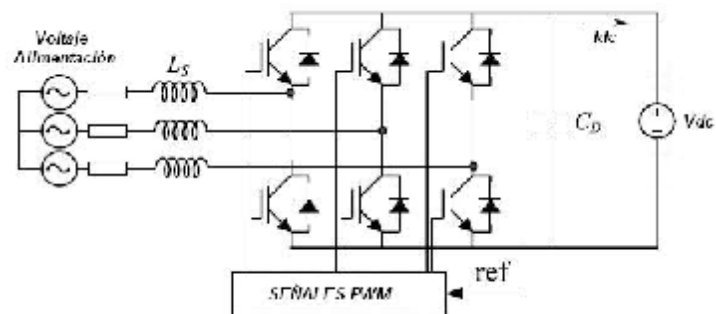


FIGURA 2.15. Estructura Rectificador

El estudio de ambas etapas se profundizara en el Capitulo 3.

2.5.4. Características de la Batería

Para este proyecto se utilizará un banco de baterías de plomo recargables, herméticamente selladas para evitar derramamientos de ácidos, y que pueden operar corrientes en ambas direcciones.

Las características de la batería se pueden revisar en el anexo C, a continuación mencionaremos las más importantes: (ANEXO C)

- Voltaje Nominal: 12VDC (6 celdas en serie)
- Capacidad Nominal: 7 Amp. Horas
- Resistencia Interna: $<25\text{m}\Omega$

2.6. Características principales del UPS Línea Interactiva a diseñar

Para este proyecto se ha considerado el diseño un convertidor bidireccional para un UPS de Línea Interactiva capaz de proteger una carga de hasta 4 Arms por un tiempo aproximado de 2 horas trabajando a un voltaje de alimentación máximo 70 Vrms. Para este propósito se utilizara un Banco de 8 Baterías de 12 V, obteniendo 96 V como fuente DC. La carga a proteger será de tipo resistiva.

El diseño se ha definido para controlar un convertidor trifásico en sus dos modos de operación.

CAPÍTULO 3

3. PRINCIPIOS DE CONVERTIDORES PWM

3.1 Convertidores DC-DC

Los convertidores DC-DC son ampliamente usados en fuentes de voltaje DC regulado por conmutación y en control de velocidad de motores DC. La principal función de los convertidores DC - DC es la de convertir un voltaje de entrada DC no regulado en voltaje de salida con un nivel deseado.[1]

El voltaje de salida en un convertidor DC - DC es generalmente controlado a través de la conmutación de un “switch” (interruptor), como el que se muestra en la Fig. 3.1.

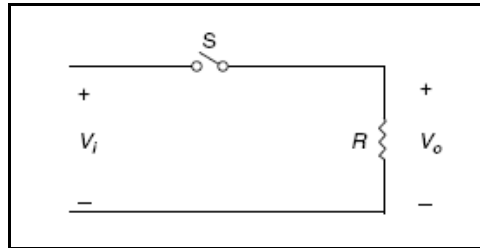


FIGURA 3.1 Esquema Convertidor DC-DC Básico.

La regulación del voltaje de salida promedio en un convertidor DC-DC se muestra en la Fig. 3.2 y está en función de:

- Tiempo de Encendido del Switch (t_{on}),
- Ancho de Pulso, y,
- Frecuencia de Switching (f_s).

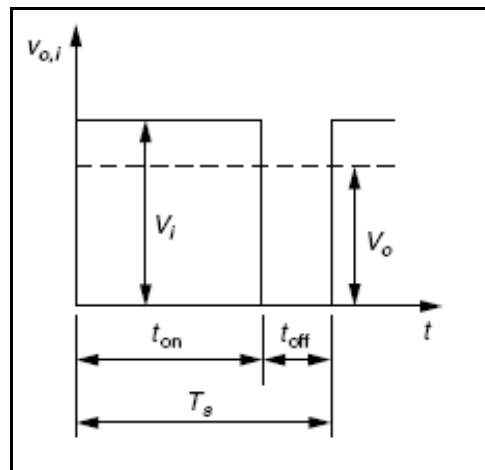


FIGURA 3.2 Forma de onda de un convertidor DC-DC.

3.1.1 Reductor (Buck)

El convertidor Buck o Reductor regula el voltaje de salida promedio a un nivel menor que el voltaje de entrada o de la fuente, a través de una conmutación controlada. [1]

Es comúnmente usado en fuentes de poder DC regulado, como en las computadoras y equipos de instrumentación.

El nivel de voltaje de salida promedio se varía ajustando el tiempo de conmutación entre sus dos posiciones, lo que en términos de ciclo de trabajo y voltaje de entrada, sería:

$$V_o = DV_i \quad (3.1)$$

V_o : Voltaje de Salida

D : Ciclo de Trabajo

V_i : Voltaje de Entrada

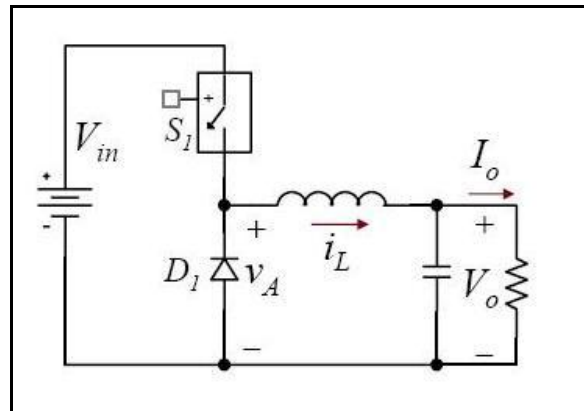


FIGURA 3.3 Convertidor Buck o Reductor.

3.1.2 Elevador (Boost)

Un convertidor Boost regula el voltaje de salida promedio a un nivel más alto que el voltaje de entrada o de la fuente. [2]

El voltaje DC de entrada está en serie con un inductor el cual actúa como fuente de corriente. Un switch en paralelo con la fuente de corriente y con la salida, es desconectado periódicamente, suministrando energía desde el inductor y la fuente logrando el incremento de su voltaje de salida promedio. A continuación el esquema básico del convertidor Boost o Elevador.

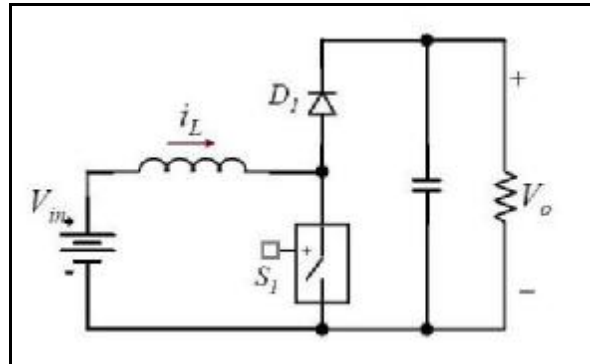


FIGURA 3.4 Convertidor Boost o Elevador.

Al igual que el convertidor Buck, la elevación del nivel de voltaje de salida se logra ajustando el tiempo de conmutación, lo que en términos de ciclo de trabajo y voltaje de entrada dada la nueva disposición de los elementos sería:

$$V_o = \frac{1}{(1-D)} V_i \quad (3.2)$$

V_o : Voltaje de Salida

D : Ciclo de Trabajo

V_i : Voltaje de Entrada

3.1.3 Modelos

En el estudio de la Electrónica de Potencia son necesarios diferentes tipos de análisis para entender el comportamiento de una señal, existiendo para cada tipo un cierto grado en que resulta apropiado representar, mediante una simulación, los componentes y el controlador de un circuito. Existen diferentes modelos debiéndose siempre verificar los resultados con prototipos de laboratorio y se clasifican en:

- Modelos de gran señal
- Modelos de pequeña señal

3.1.3.1 De gran señal

Los modelos de gran señal se refieren a las ecuaciones y sus respectivos circuitos equivalentes (si es que los hay), que reflejan los valores instantáneos de las señales de interés, y permiten entender mejor el funcionamiento del circuito.

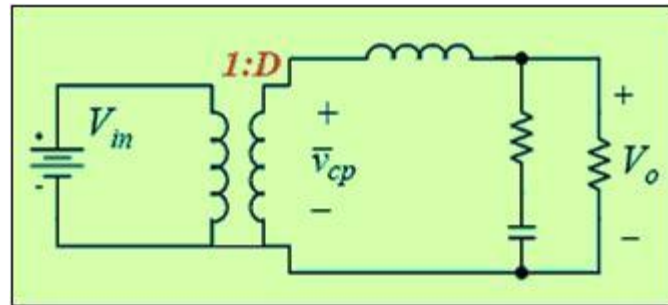


FIGURA 3.5 Diagrama de Gran Señal del Buck

$$V_o = \overline{v_{cp}} = DV_{in}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D$$

FIGURA 3.6 Ecuaciones del Convertidor Buck Gran Señal

3.1.3.2 De pequeña Señal

El modelo de pequeña señal no es otra cosa que la linealización de los modelos de gran señal para poder analizar las pequeñas variaciones de las señales de interés en el entorno de un punto de operación. Si el modelo resultante tiene varias variables de entrada (perturbaciones), éstas se analizan una a la vez fijando las otras a cero, para poder obtener el efecto de esta variación en una variable de salida de interés. A partir de

este análisis se pueden obtener las funciones de transferencia necesarias para diseñar el control de lazo cerrado. El mismo concepto se aplica para convertidores trifásicos. Si no es necesario se pueden obviar los circuitos equivalentes y trabajar directamente con las ecuaciones.

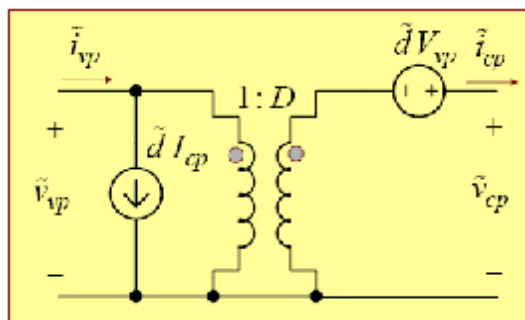


FIGURA 3.7 Circuito equivalente Pequeña Señal

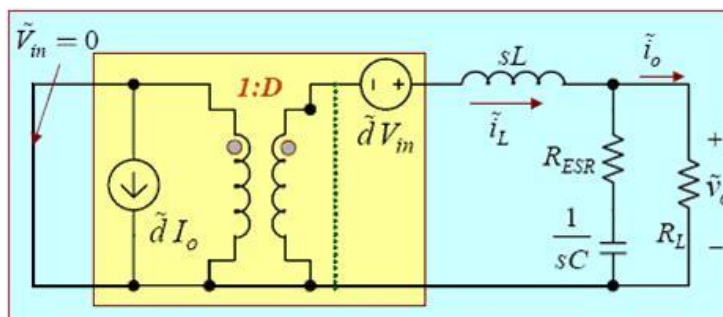


FIGURA 3.8 Diagrama de Pequeña Señal del Buck

$$\Delta v_{cp} = D\Delta v_{vp} + \Delta dV_{vp}$$

$$\Delta i_{vp} = D\Delta i_{cp} + \Delta dI_{cp}$$

$$\frac{\Delta v_o}{d} = \frac{V_{in}(1 + sCR_{ESR})}{1 + s\left[\frac{L}{R_L} + CR_{ESR}\right] + s^2LC\left(1 + \frac{R_{ESR}}{R_L}\right)}$$

FIGURA 3.9 Ecuaciones del Convertidor Buck Pequeña Señal

3.2 Convertidores Trifásicos

Se puede considerar a un convertidor trifásico como la unión de tres convertidores DC-DC con señales de referencias (moduladoras) alternas con un nivel DC. La diferencia entre los voltajes de salida resulta puramente alterna. Existen diferentes técnicas de conversión siendo de particular interés la de PWM (Modulación por Ancho de Pulso) por permitir la operación a frecuencia constante y variable. [1]

3.2.1 Inversores PWM

Los Convertidores de DC – AC se denominan Inversores y su función es cambiar un voltaje de entrada DC a un voltaje trifásico de salida AC, con una magnitud y frecuencia deseadas.

El voltaje de salida puede ser fijo o variable, a una frecuencia fija o variable. Un voltaje variable de salida se puede obtener haciendo variar el voltaje de entrada DC y manteniendo constante la ganancia del inversor; o, con un voltaje DC de entrada fijo, no controlable, pero haciendo variar la ganancia del inversor, lo que se consigue normalmente con modulación de ancho de pulso.

$$GANANCIA = \frac{V_{SALIDA_AC}}{V_{ENTRADA_DC}} \quad (3.3)$$

Con la disponibilidad de dispositivos semiconductores de potencia de alta velocidad, se pueden minimizar los contenidos de armónicos del voltaje de salida, o al menos reducirlos de forma importante, mediante técnicas de conmutación.

En aplicaciones de grandes potencias se puede conectar tres puentes inversores monofásicos para formar la configuración de un inversor trifásico, siempre que las señales de control de los

inversores monofásicos estén separados 120° entre sí, para obtener voltajes fundamentales trifásicos balanceados.

También se puede obtener una salida trifásica con una configuración de seis transistores y seis diodos.

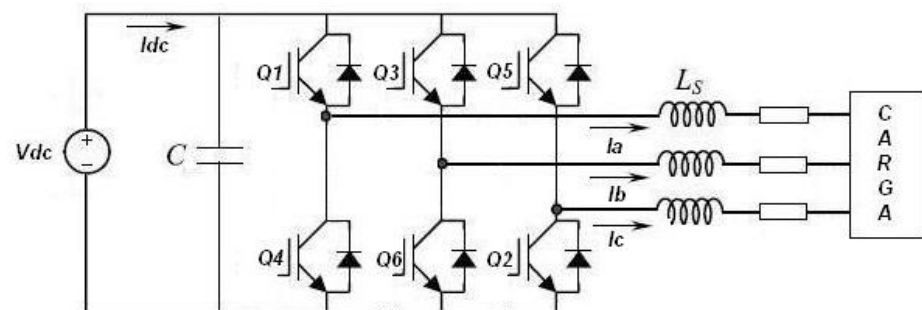


FIGURA 3.10 Inversor Trifásico 6 Transistores y 6 Diodos.

En el Inversor PWM, se hace una Modulación Sinusoidal por Ancho de Pulso (SPWM), variando el ancho de cada pulso en proporción a la comparación entre una señal sinusoidal de referencia con una onda portadora triangular de frecuencia f_c .

A la salida del convertidor se encuentra un Filtro Inductivo que filtrará la señal de corriente que va a la carga. [1]

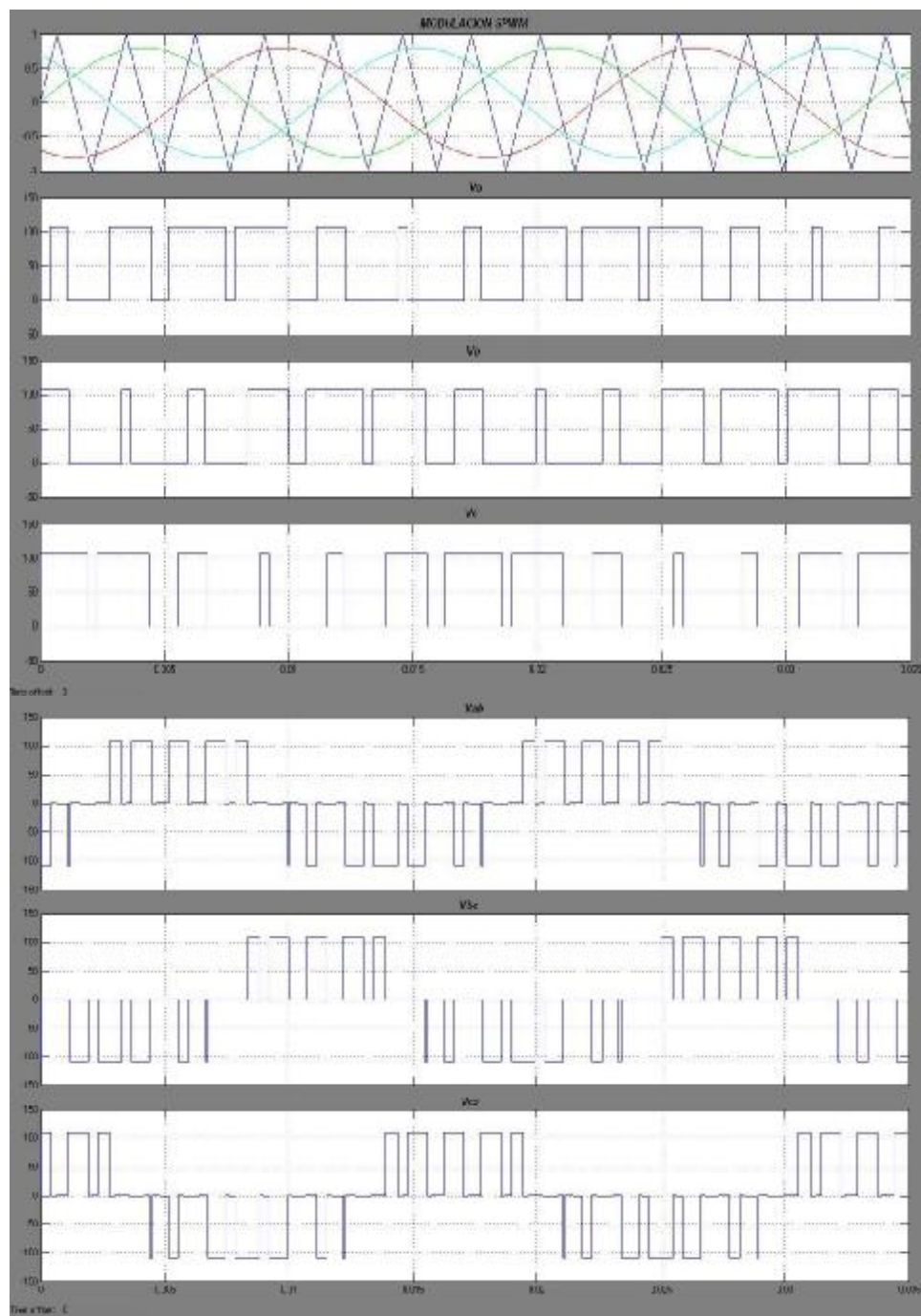


FIGURA 3.11 a) Modulación SPWM, b) Voltaje Modulado A, c) Voltaje Modulado B, d) Voltaje Modulado C, e) Voltaje Vab, f) Voltaje Vbc, g) Voltaje Vca.

3.2.2 Rectificador PWM

Los Convertidores de AC – DC se denominan Rectificadores y su función es cambiar un voltaje de entrada AC Trifásico a un voltaje DC.

El convertidor genera un voltaje cuya fundamental corresponde a una sinusoidal que atrasa al voltaje de la línea a un determinado ángulo, que puede ser controlado, manteniendo así el voltaje DC al nivel deseado.

La corriente es filtrada por el inductor, mientras que el voltaje de la línea no necesita ser filtrado, pues es independiente de la corriente. [1]

Los rectificadores PWM tienen las siguientes ventajas:

1. Tanto el voltaje como la corriente pueden ser modulados (a través de modulación de ancho de pulso – PWM), generando menos armónicos en el sistema.

2. Se puede controlar el Factor de Potencia.
3. Se puede diseñar rectificadores tanto con Fuente de Voltaje o Corriente.
4. El factor de potencia se puede invertir invirtiendo la corriente en el enlace DC.

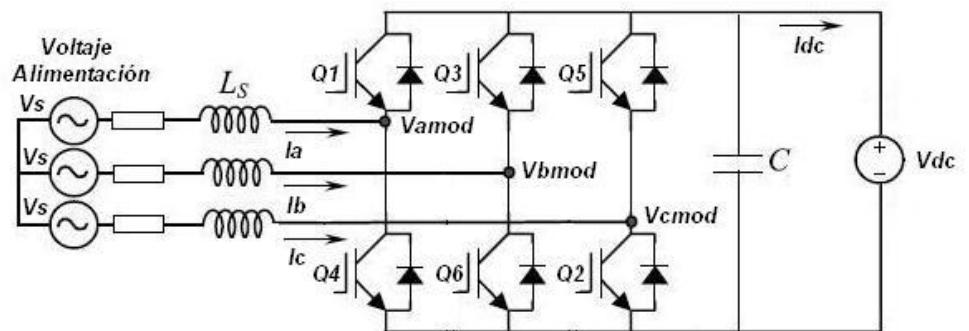


FIGURA 3.12 Rectificador con Modulación PWM.

3.2.3 Modulación Sinusoidal

La Modulación Sinusoidal por Ancho de Pulso (SPWM), es la técnica de modulación mas utilizada a nivel industrial en la actualidad. Para este análisis se lo aplicará al circuito descrito en la figura 3.10

En esta técnica el ancho de los pulsos se varía de acuerdo a la proporción resultante de la comparación de las onda sinusoidales (v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}) con una onda triangular de alta frecuencia. Se definen entonces, las señales sinusoidales como de referencia, con una frecuencia f_r , y, la señal triangular como la portadora, con una frecuencia f_c . La relación entre ambas frecuencias debe ser:

$$f_c \gg f_r \quad (3.4)$$

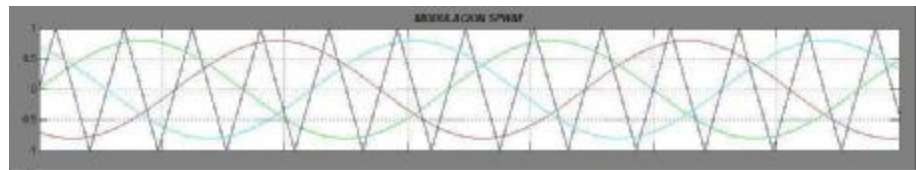


FIGURA 3.13 Comparación entre la Portadora y la Referencia

Y además, dicha relación debe ser siempre impar y múltiplo de tres, de modo que se garantice que los voltajes de fase generados (V_{aN} , V_{bN} y V_{cN}), que son los que controlan la conmutación, sean idénticos en todo momento, desfasados 120° entre sí y libres de armónicos pares; es más, de este modo las corrientes armónicas múltiplos de tres están en fase y se pueden eliminar fácilmente utilizando una conexión en Y de la carga, con

lo que se logra que la Distorsión Armónica Total disminuya, consiguiendo por ende una onda sinusoidal menos deformada y uniforme en todas las fases.



FIGURA 3.14 Voltajes Modulados Generados (V_{aN} , V_{bN} y V_{cN})

La frecuencia f_r será la que determine la frecuencia de la señal de salida del inversor (f_o), y su amplitud pico A_r es la que, por definición, controla el índice de modulación M . [3]

$$M = \frac{A_r}{A_c} = \frac{V_o}{V_s} \therefore 0 < M < 1 \quad (3.5)$$

Donde:

A_c : Amplitud pico de la señal portadora

A_r : Amplitud pico de la señal referencia

V_s : Voltaje DC de entrada

V_o : Voltaje Pico de Salida Inversor

M : Índice de Modulación

VOLTAJES DE LINEA A NEUTRO

$$V_{aN} = V_o \cos(\omega_o t) = MV_s \cos(\omega_o t) \quad (3.6)$$

$$V_{bN} = V_o \cos(\omega_o t - 2p/3) = MV_s \cos(\omega_o t - 2p/3) \quad (3.7)$$

$$V_{cN} = V_o \cos(\omega_o t + 2p/3) = MV_s \cos(\omega_o t + 2p/3) \quad (3.8)$$

VOLTAJES DE LINEA A LINEA

$$V_{ab} = V_{aN} - V_{bN} = M \sqrt{3} V_s \cos\left(\omega_o t + \frac{p}{6}\right) \quad (3.9)$$

$$V_{bc} = V_{bN} - V_{cN} = M \sqrt{3} V_s \cos\left(\omega_o t - \frac{p}{2}\right) \quad (3.10)$$

$$V_{ca} = V_{cN} - V_{aN} = M \sqrt{3} V_s \cos\left(\omega_o t + \frac{5p}{6}\right) \quad (3.11)$$

3.2.4 Modelos

El modelo a implementar se basa en un UPS de Línea Interactiva descrito de forma unifilar en el esquema a continuación.

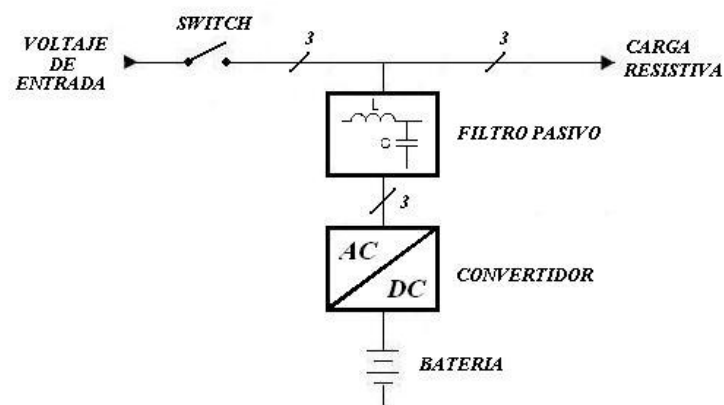


FIGURA 3.15 Unifilar de un UPS Línea Interactiva

Las partes que componen el sistema del UPS son las siguientes:

- La Fuente DC: Banco de Baterías
- Convertidor Trifásico: Conformado por un Modulo de IGBT's
- Filtro Pasivo: Inductor – Capacitor (Filtro Pasa Bajos)
- Fuente de Alimentación AC: Red Trifásica
- Carga: Banco de Resistencias

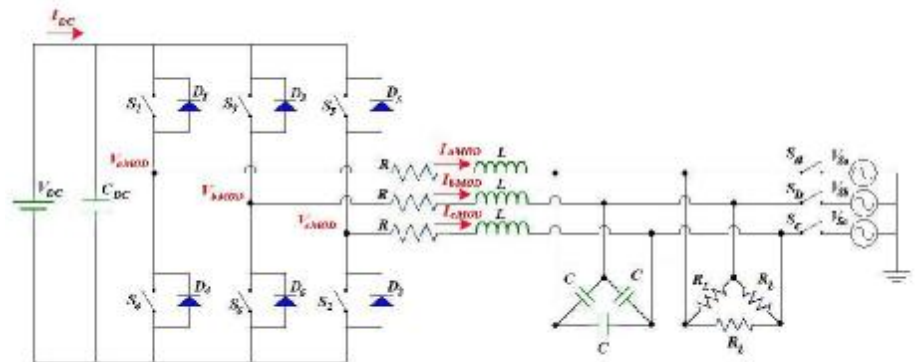


FIGURA 3.16 Esquema Electrónico de un UPS Línea Interactiva

Para la modelación del UPS en modo rectificador no se considerará el banco de capacitores ni la carga, por estar en paralelo con la fuente AC.

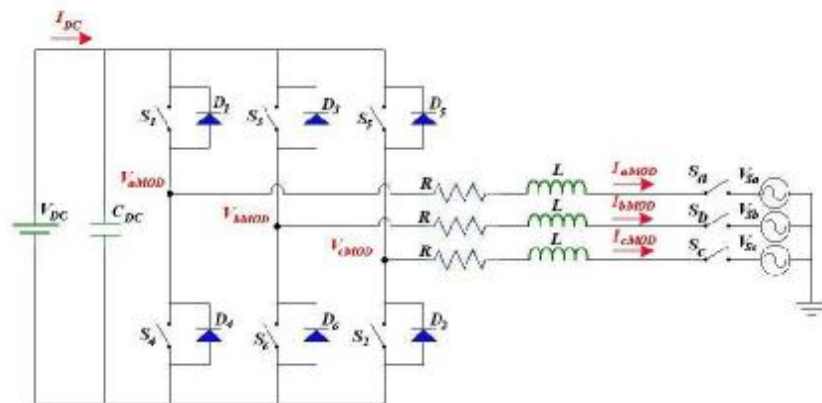


FIGURA 3.17 Esquema Electrónico del UPS MODO RECTIFICADOR

Según el diagrama, las variables en el dominio del tiempo se definirán:

SEÑALES TRIFASICAS

$$\overline{V}_S = \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\overline{V}_{MOD} = \begin{bmatrix} V_{MODa} \\ V_{MODb} \\ V_{MODc} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\overline{I}_{MOD} = \begin{bmatrix} I_{MODa} \\ I_{MODb} \\ I_{MODc} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

De donde se obtiene:

$$\overline{V}_{MOD} = L \frac{\partial \overline{I}_{MOD}}{\partial t} + R \overline{I}_{MOD} + \overline{V}_S \quad (3.15)$$

Para el análisis y la modelación de las ecuaciones se debe transformar el Sistema Trifásico conocido, de referencia Estática (a-b-c), a uno de Dos Fases Ortogonales Rotacional (d-q). Para este propósito utilizaremos la transformada de Park.

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{4p}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{4p}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{4p}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{4p}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Luego aplicamos la Transformada de Park a la ecuación 3.17.

$$T \overline{V_{MOD}} = LT \frac{\partial \overline{I_{MOD}}}{\partial t} + RT \overline{I_{MOD}} + T \overline{V_s} \quad (3.18)$$

Vectorialmente:

$$T \begin{bmatrix} V_{MODa} \\ V_{MODb} \\ V_{MODc} \end{bmatrix} = LT \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} I_{MODa} \\ I_{MODb} \\ I_{MODc} \end{bmatrix} + RT \begin{bmatrix} I_{MODa} \\ I_{MODb} \\ I_{MODc} \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Para la obtención del modelo utilizaremos el método matemático

de derivadas parciales que nos proporcione el término $T \frac{\partial \overline{I_{MOD}}}{\partial t}$

$$\frac{\partial}{\partial t}(T \overline{I_{MOD}}) = T \frac{\partial}{\partial t}(\overline{I_{MOD}}) + \frac{\partial}{\partial t}(T) \overline{I_{MOD}} \quad (3.20)$$

$$T \frac{\partial}{\partial t}(\overline{I_{MOD}}) = \frac{\partial}{\partial t}(T \overline{I_{MOD}}) - \frac{\partial}{\partial t}(T) \overline{I_{MOD}} \quad (3.21)$$

Donde:

$$T \frac{\partial}{\partial t}(\overline{I_{MOD}}) = \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} I_{dMOD} \\ I_{qMOD} \end{bmatrix} - \frac{\partial}{\partial t}(T) \overline{I_{MOD}} \quad (3.22)$$

Derivando la Matriz de la Transformada de Park de la ecuación

3.21 obtenemos

$$\frac{\partial}{\partial t}(T) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} -w \sin(wt) & -w \sin\left(wt - \frac{2p}{3}\right) & -w \sin\left(wt - \frac{4p}{3}\right) \\ -w \cos(wt) & -w \cos\left(wt - \frac{2p}{3}\right) & -w \cos\left(wt - \frac{4p}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\text{Donde: } \frac{\partial}{\partial t}(T) \overline{I_{MOD}} = w \begin{bmatrix} I_{qMOD} \\ -I_{dMOD} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\text{Reemplazando: } T \frac{\partial}{\partial t}(\overline{I_{MOD}}) = \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} I_{dMOD} \\ I_{qMOD} \end{bmatrix} - w \begin{bmatrix} I_{qMOD} \\ -I_{dMOD} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Desarrollando la ecuación 3.22

$$\begin{bmatrix} V_{dMOD} \\ V_{qMOD} \end{bmatrix} = L \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} I_{dMOD} \\ I_{qMOD} \end{bmatrix} - \mathbf{wL} \begin{bmatrix} I_{qMOD} \\ -I_{dMOD} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} I_{dMOD} \\ I_{qMOD} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{dS} \\ V_{qS} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Separando las ecuaciones en sus dos fases tenemos:

$$V_{dMOD} = L \frac{\partial}{\partial t} (I_{dMOD}) + RI_{dMOD} + V_{dS} - \mathbf{wLI}_{qMOD} \quad (3.27)$$

$$V_{qMOD} = L \frac{\partial}{\partial t} (I_{qMOD}) + RI_{qMOD} + V_{qS} + \mathbf{wLI}_{dMOD} \quad (3.28)$$

Se asume que $V_{dS} = V_S$ y que $V_{qS} = 0$ porque se toma como referencia al voltaje de la fuente, entonces:

$$V_{dMOD} = L \frac{\partial}{\partial t} (I_{dMOD}) + RI_{dMOD} + V_S - \mathbf{wLI}_{qMOD} \quad (3.29)$$

$$V_{qMOD} = L \frac{\partial}{\partial t} (I_{qMOD}) + RI_{qMOD} + 0 + \mathbf{wLI}_{dMOD} \quad (3.30)$$

Por medio de un desacoplamiento en el compensador, como se mostrara en el modelo final, y para simplificar el modelo, se obvian los términos $-\mathbf{wLI}_{qMOD}$ y \mathbf{wLI}_{dMOD} . Aplicando la Transformada de Laplace se obtiene:

$$V_{dMOD} = sLI_{dMOD} + RI_{dMOD} \quad (3.31)$$

Despejando:

$$\frac{I_{dMOD}}{V_{dMOD}} = \frac{\frac{1}{L}}{s + \frac{R}{L}} \quad (3.32)$$

De igual forma con la Ec. 3.30:

$$\frac{I_{qMOD}}{V_{qMOD}} = \frac{\frac{1}{L}}{s + \frac{R}{L}} \quad (3.33)$$

De la parte correspondiente a la Fuente DC, se especifican las siguientes ecuaciones de Potencia Activa:

$$P_{DC} = P_{MOD} \quad (3.34)$$

$$P_{DC} = P_R + P_S \quad (3.35)$$

Considerando que la Potencia consumida por la Resistencia (P_R) es despreciable en comparación con la Potencia de la Alimentación Trifásica (P_S), la asumiremos como cero.

$$P_{DC} = P_S \quad (3.36)$$

$$V_{DC}I_{DC} \approx \frac{3}{2}(V_{dS}I_{dMOD} + V_{qS}I_{qMOD}) \quad (3.37)$$

Y de acuerdo a lo previamente definido por el desfase de 0° , quedaría:

$$V_{DC} I_{DC} \approx \frac{3}{2} V_s I_{dMOD} \quad (3.38)$$

Por lo tanto las relaciones entre Voltajes y Corrientes, estarían descritas en la siguiente ecuación:

$$\frac{I_{dMOD}}{I_{DC}} \approx \frac{2}{3} \frac{V_{DC}}{V_s} \quad (3.39)$$

3.2.5 Controlador

Para la realización de todo control lo primero que se realiza es la adecuación de las variables a controlar. Para este caso estas variables tienen un comportamiento sinusoidal por lo cual nos valemos de las diferentes transformadas conocidas para obtener comportamientos DC que simplifican el diseño del control.

3.2.5.1 Transformada de Park

Las transformaciones matemáticas se usan frecuentemente para separar variables, facilitando la resolución de ecuaciones complejas que están en función del tiempo. Para la realización del control se debe transformar un sistema coordinado trifásico balanceado estacionario (abc) en uno de dos coordenadas ortogonales rotativo (dq). Con este objeto se utilizará dos transformaciones denominadas: [17][18]

- Transformada de Clark
- Transformada de Park

La función de la transformada de Clark permite convertir un Sistema Trifásico Estacionario Equiespaciado a un Sistema Ortogonal a, b, g también estacionario, donde $g = 0$, por lo que realmente se trata de un sistema de dos coordenadas.

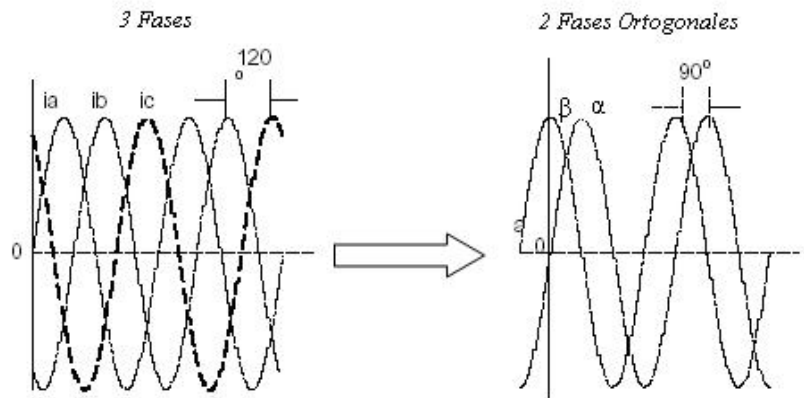


FIGURA 3.18 Transformada de Clark

Las ecuaciones que definen la transformada son:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

La función de la Transformada de Park es convertir el sistema de dos Coordenadas Ortogonales estacionarias a un sistema rotativo (dq) con una velocidad angular ω

$$V_d = a \cos(q) + b \sin(q) \quad (3.41)$$

$$V_q = -a \sin(q) + b \cos(q) \quad (3.42)$$

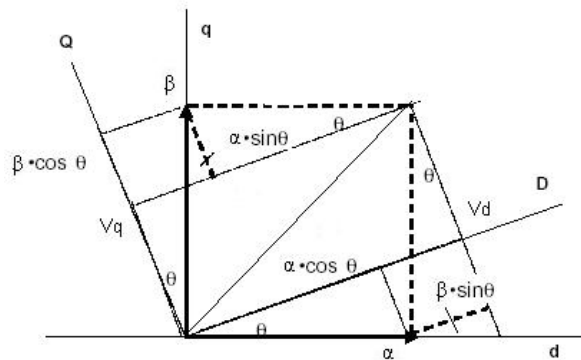


FIGURA 3.19 Trasmorada de Park

Es de interés para este estudio la Inversa de la Transformación de Park, dada por las ecuaciones:

$$V_a = V_d \sin(\omega t) + V_q \cos(\omega t) + V_0 \quad (3.43)$$

$$V_b = V_d \sin\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right) + V_q \cos\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right) + V_0 \quad (3.44)$$

$$V_c = V_d \sin\left(\omega t + \frac{2p}{3}\right) + V_q \cos\left(\omega t + \frac{2p}{3}\right) + V_0 \quad (3.45)$$

3.2.5.2 Controladores PI

Los controladores continuos se utilizan en controles de lazo cerrado. Existen distintos tipos de controladores continuos; los principales son los tipos:

§ Proporcional (P)

§ Proporcional – Integral (PI)

§ Proporcional – Integral – Derivativo (PID)

Los tipos de controladores se diferencian entre sí según su dinámica, es decir, en la rapidez con la que llevan el valor real hasta el valor de referencia en función del nivel de desviación del control.

La acción de un controlador Proporcional – Integral, como su nombre lo indica consta de dos partes fundamentales:

- La *parte proporcional*, correspondiente al producto entre la señal de error (Diferencia entre Referencia y Salida) y la constante proporcional K_p , seleccionada para que haga la calibración del error de estado estable. La parte Proporcional no considera el tiempo por lo que es necesario combinarla con las componentes integral y/o derivativas

- La *parte integral*, esta en función del tiempo y busca disminuir y eliminar el error de estado estable, en muchos casos incrementado por la constante proporcional. Su operación consiste en promediar el error durante un tiempo determinado y luego multiplicarlo por la constante integral K_i para finalmente en combinación con la parte proporcional obtener una respuesta estable en el sistema. [16]

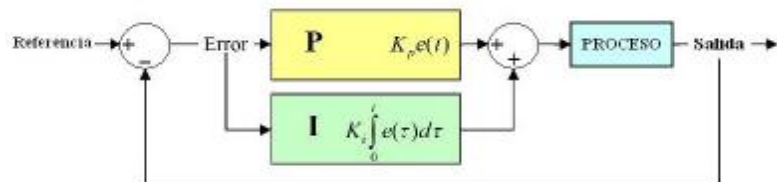


FIGURA 3.20 Diagrama de Bloques de un Control PI

3.2.5.3 Circuito PLL

Un circuito PLL (Phase Locked Loop) es un sistema realimentado cuyo objetivo principal consiste en la generación de una señal de salida de amplitud fija; y, frecuencia y fase coincidente con la de la entrada.

Comprende tres etapas fundamentales:

- § Detector de fase: Suministra una salida que depende del desfase entre las señales de entrada y de salida. Y alimenta el filtro Pasa Bajos con la diferencia entre sus frecuencias.
- § Filtro Pasa-Bajo: Cumple con su función de filtrar frecuencias bajas proporcionando a la salida un voltaje en base a la diferencia de frecuencias de la etapa anterior.
- § Oscilador Controlado por Tensión: Genera la tensión de salida (V_o), con frecuencia dependiente del voltaje de salida del Filtro.

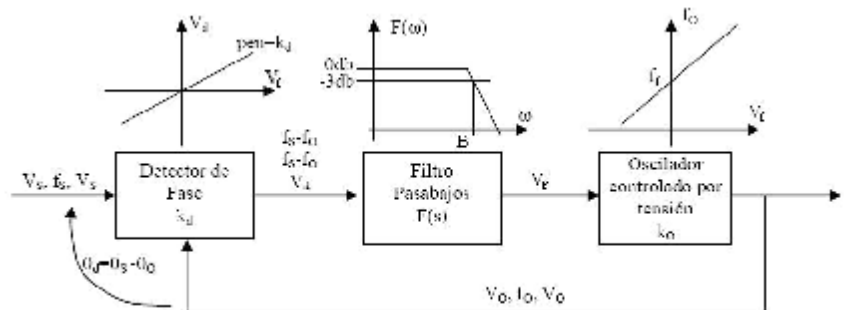


FIGURA 3.21 Diagrama de un Control PLL

La operación del PLL se da en dos pasos. El primero consiste en sincronizar las frecuencias de las señales de Entrada y Salida. Como el Voltaje de salida está en función del Voltaje del Filtro, el que a su vez depende del desfase $\theta_s - \theta_o$, una vez que la sincronización se ha conseguido y dado que la realimentación impone que en régimen permanente, las señales de entrada y salida tengan un desfase dependiente de la desviación de frecuencia, se da el segundo paso, que consiste en eliminar el desfase. [19]

3.3 Diseño del Convertidor Trifásico para un UPS Línea Interactiva

De acuerdo a las características descritas en el capítulo anterior del UPS a diseñar, se seleccionó como Convertidor Trifásico para la implementación, un modulo conformado por seis IGBT.

3.3.1 Especificaciones

El Modulo Convertidor corresponde a la serie IRAMY20UP60B, del fabricante: International Rectifier.



FIGURA 3.22 Módulo Convertidor IRAMY20UP60B

Consiste en un Circuito Integrado Híbrido de potencia que combina el Módulo de Fuerza (seis IGBTs), con el Módulo Amplificador, y sus parámetros principales máximos son de: 20A y 600V.

Para garantizar un alto nivel de protección y operación a prueba de fallas, el módulo trae incorporado un monitor de temperatura y las debidas protecciones de sobrecorriente y sobrevoltaje.

La aplicación del módulo de IGBT en el UPS es trabajar como un Convertidor (DC-AC) en el MODO INVERSOR y como un convertidor (AC-DC) para el MODO RECTIFICADOR. (ANEXO C)

3.3.2 Cálculo de Componentes

A continuación se describirá el dimensionamiento de los inductores y capacitores según las especificaciones del diseño.

3.3.2.1 Cálculo de la Inductancia

Partiendo de la ecuación básica del Inductor

$$L \frac{\partial i}{\partial t} = V_L \quad (3.46)$$

Obtenemos el dimensionamiento del inductor

$$L = \frac{V_L(1-D)T_s}{\Delta I_L} \quad (3.47)$$

Como se desea obtener la inductancia mínima necesitaríamos el V_{LMAX} . Se definen entonces, los siguientes parámetros:

$$V_L = 50V_{RMS} \Rightarrow V_{LMAX} = 40.82[V_{PICO}]$$

$$f_s = 20kHz \Rightarrow T_s = 50ms$$

$\Delta I_L = 20\% I_{MAX}$, donde:

$$I_{MAXRMS} = \sqrt{3} \frac{V_{LL}}{R_{min}} = \sqrt{3} \frac{50V}{20\Omega} = 4.33[A_{RMS}]$$

$$I_{MAXPICO} = \sqrt{2} I_{MAXRMS} = \sqrt{2}(4.33A) = 6.1235[A_{pico}]$$

$$\Rightarrow \Delta I_L = 1.2248[A]$$

Reemplazando obtenemos: $L_{min} = 1.1666[mH]$

Con el valor de la Inductancia, se procede al diseño del inductor. Para lo cual se cuenta con un núcleo fabricado por MICROMETAL, cuyo material se denomina T520-40 y tiene las siguientes características: Permeabilidad: $m_o = 60$, Densidad: 6.9 g/cm^3 y Dimensiones: [20]

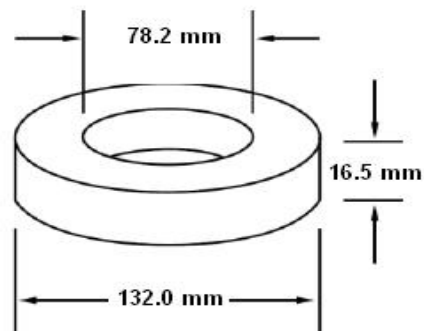


FIGURA 3.23 Dimensiones del Núcleo T520-40

MICROMETALS ofrece un programa que según el tipo del núcleo y los datos del diseño, permite calcular el número de vueltas que son necesarias para alcanzar la inductancia deseada según sea su aplicación. De igual manera proporciona el calibre del inductor.

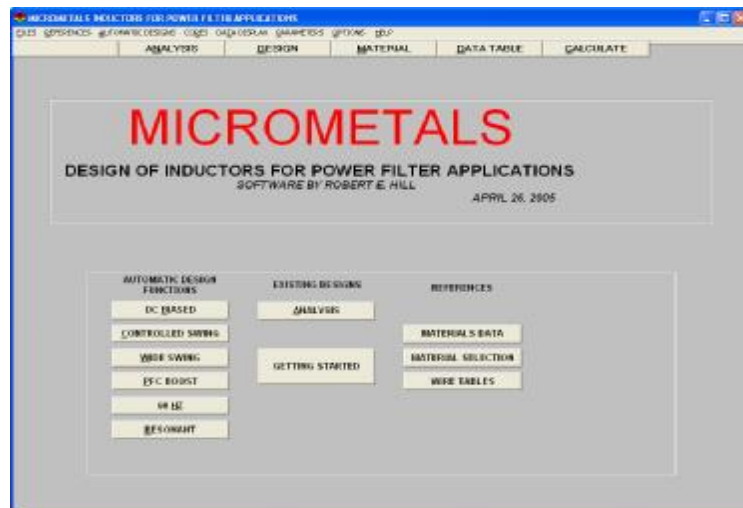


FIGURA 3.24 Programa para diseño de inductores de MICROMETALS

Del ingreso de datos se obtuvo: Número de vueltas: 108

Vueltas y Calibre Conductor: 14 AWG

REQUIREMENTS

DESIGN REQUIREMENTS

POWER FACTOR BOOST INDUCTOR

INDUCTANCE AT MAX CURRENT: 1160 micro HENRIES
 MAXIMUM DC RESISTANCE: 0.00 OHMS (Optional)
 MAXIMUM CURRENT: 6.1235 AMPERES

PEAK REGULATOR INPUT VOLTAGE: 40.82 VOLTS
 REGULATOR DC OUTPUT VOLTAGE: 100 VOLTS
 FREQUENCY: 20 KHERTZ
 TEMPERATURE: 55.0 DEGREES C

CORE SHAPE: TOROID STACKED CORES: 1
 WINDING TYPE: SINGLE LAYER WIRE STRANDS: 1

CORE MATERIAL: [] OK
 RIPPLE CURRENT: 0.800 AMPERES p-p [] CANCEL

FIGURA 3.25 Ingreso de parámetros para el diseño del inductor

Analysis

PRINT ELECTRICAL MECHANICAL DESIGN AC PERM INDUCTANCE LOSS TISS

POWER FACTOR BOOST INDUCTOR ANALYSIS Sat Aug 05 18:35:05 2006

CORE PART NUMBER: 1529 40 X 1 NUMBER IN STACK
 WIRE GAUGE / STRANDS: #14 AWG X 1 STRANDS
 NUMBER OF TURNS: 108
 MAXIMUM PEAK CURRENT: 6.12 AMPERES
 REGULATOR DC OUTPUT VOLTAGE: 40.82 VOLTS
 PEAK REGULATOR INPUT VOLTAGE: 100.00 VOLTS
 FREQUENCY: 20.0 KHERTZ
 AMBIENT TEMPERATURE: 55.0 DEGREES C

OK

INDUCTANCE	1165	U_H	CORE LOSS	0.531	W
DC RESISTANCE	0.10	OHMS	COPPER LOSS	1.600	W
AC RESISTANCE	0.10	OHMS	WIND	0.066	in
RIPPLE CURRENT	1.07	AMPS p-p	SURFACE AREA	383.0	sq cm
DC BIAS	35.1	DEG	TEMP RISE @ 0 HRS	5.2	DEG C
AVG. AC FLUX DENSITY	110	GAUSS	TIME TO 115% LOSS	3e+05	HOURS
PERCENT PERM	64	PCT	LIFE LIMIT	1e+06	HOURS
CORE AL VALUE	119	nh			

FIGURA 3.26 Resultados para el diseño del inductor

3.3.2.2 Cálculo de la Capacitancia

Para el cálculo de la capacitancia se utiliza la ecuación básica del voltaje en un Capacitor:

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt \quad (3.48)$$

Despejando:
$$C = \frac{\Delta I_L T_s}{8\Delta V_o} \quad (3.49)$$

Se define entonces: $\Delta V_o = 1\% V_{pico}$

Reemplazando con los datos previamente calculados, obtenemos una $C_{MIN} = 18.7531[mF]$.

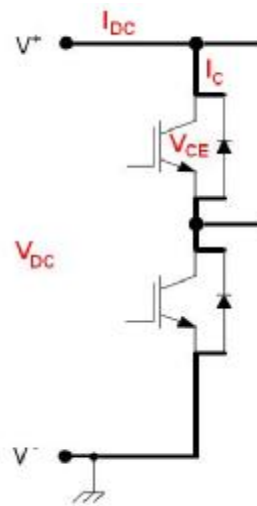
Como se mostró en el modelo del UPS, se trabajará con un Banco conectado en DELTA en paralelo a la carga, y dada la relación $C = 3C_{\Delta}$, obtenemos una:

$$C_{\Delta} = 6.2510[mF]$$

3.3.2.3 Cálculo de Semiconductores

Dado que para este proyecto se está usando el Convertidor antes descrito, en el que se incorpora el modulo de fuerza, el cálculo de los semiconductores no aplica.

Con el objeto de dejar especificados los parámetros básicos para este punto, se toma el detalle de las Hojas de Datos Técnicos disponibles por el fabricante:



DESCRIPCION	PARAMETRO	VALOR
Potencia Disipada	P_D	68 W
Voltaje de Saturación Colector - Emisor	$V_{CE(ON)}$	2,5 V _{MAX}
Corriente de Colector Máxima	I_C	20 A _{RMS}

FIGURA 3.27 Parámetros Básicos para el IGBT

3.3.3 Simulaciones

Con todos los datos obtenidos se procede a la simulación de la operación del UPS de Línea Interactiva

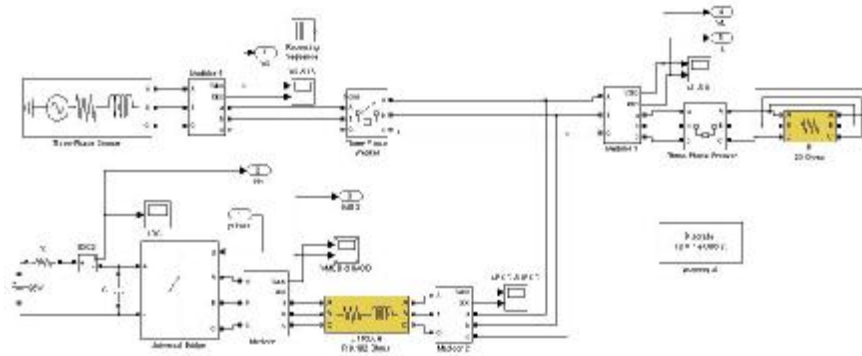


FIGURA 3.28 Convertidor MODO INVERSOR (Switch Abierto)

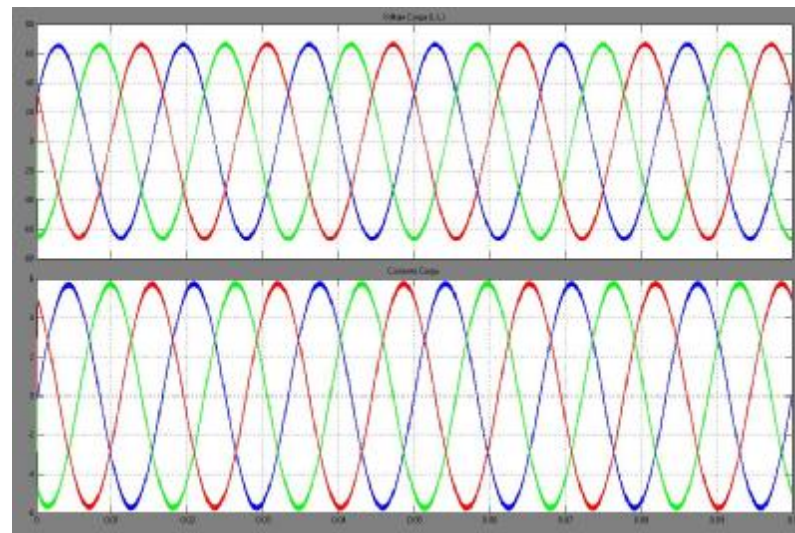


FIGURA 3.29 Voltaje y Corriente en la Carga

Se muestra entonces, que el voltaje y la corriente en la carga están en fase; y, comparando la corriente en la carga y la

generada por el convertidor, se observa que son iguales, lo que corresponde al comportamiento del INVERSOR.

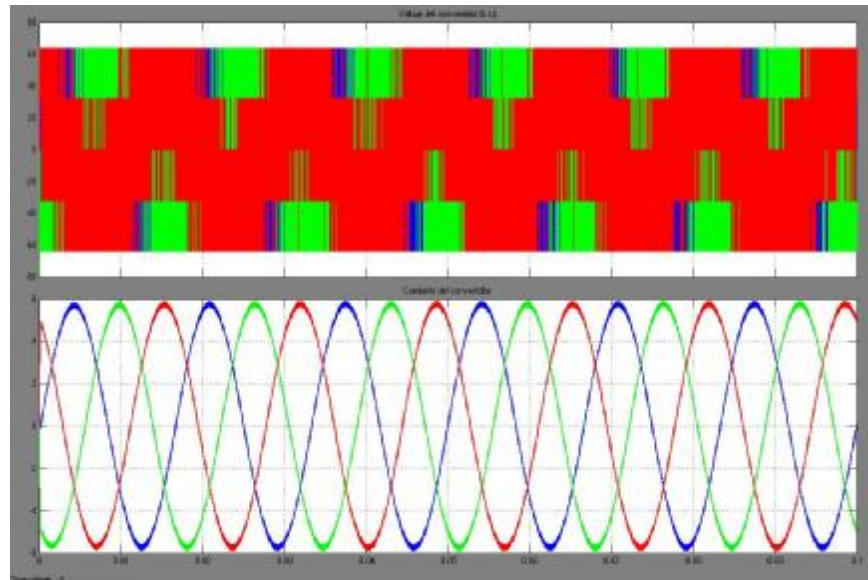


FIGURA 3.30 Voltaje y Corriente Modulado

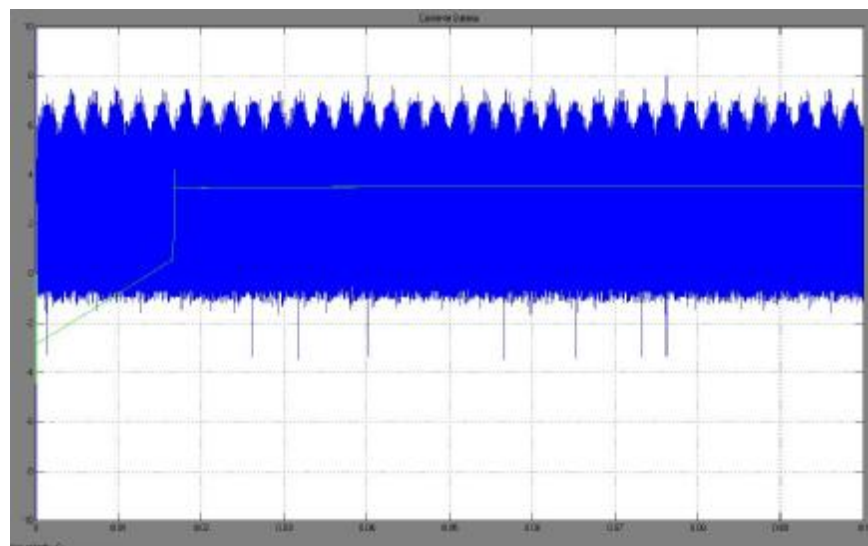


FIGURA 3.31 Corriente en la Batería

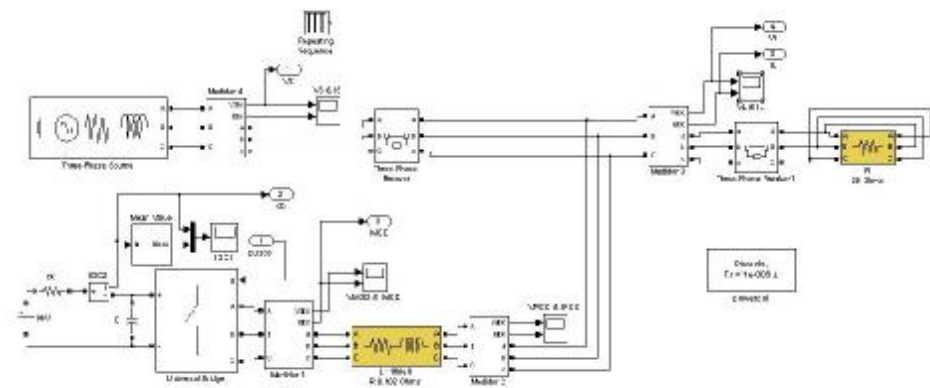


FIGURA 3.32 Convertidor MODO RECTIFICADOR (Switch Cerrado)

Se observa como diferencia principal las formas de onda de voltaje y corriente en la carga, los que en el MODO INVERSOR son troceados, mientras que en el RECTIFICADOR son puros.

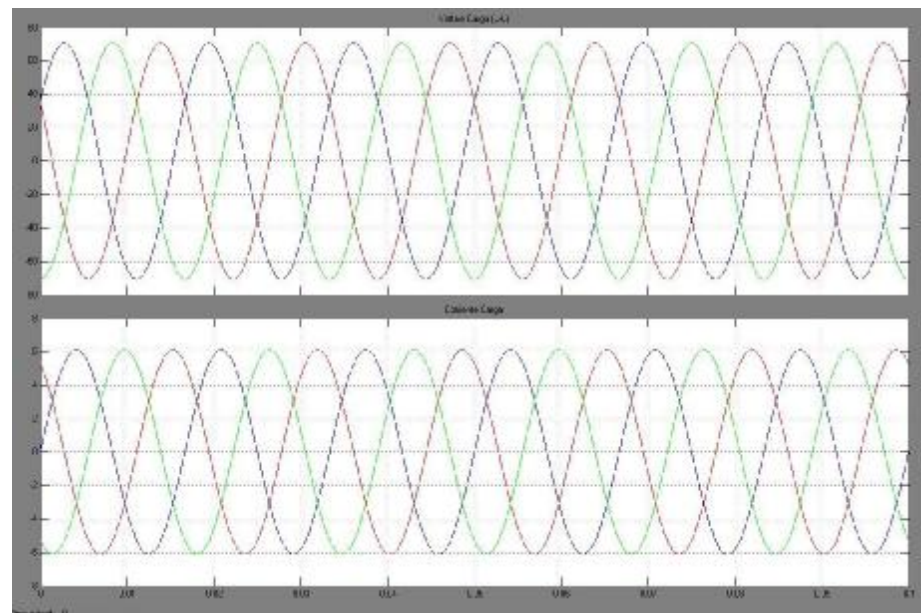


FIGURA 3.33 Voltaje y Corriente en la Carga

Se observa ahora que la corriente en la carga y la generada por el convertidor, están desfasadas 180° , lo que corresponde con el comportamiento del modo RECTIFICADOR.

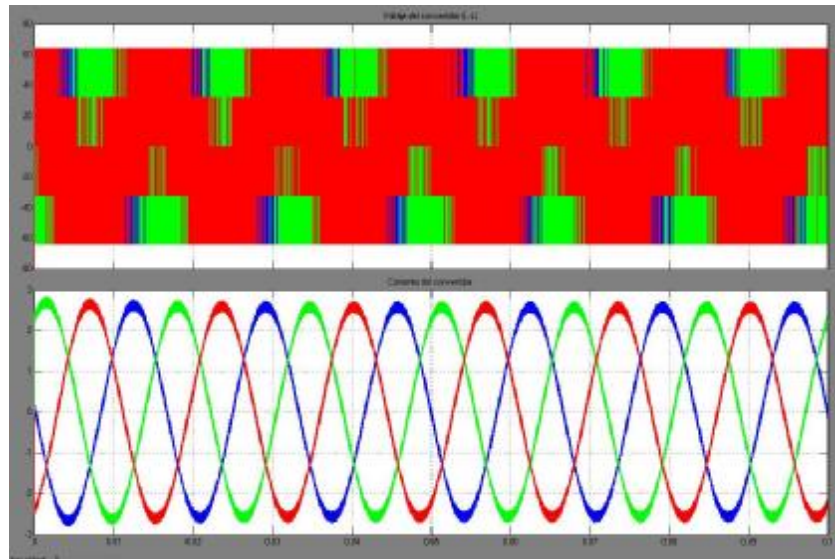


FIGURA 3.34 Voltaje y Corriente Modulado

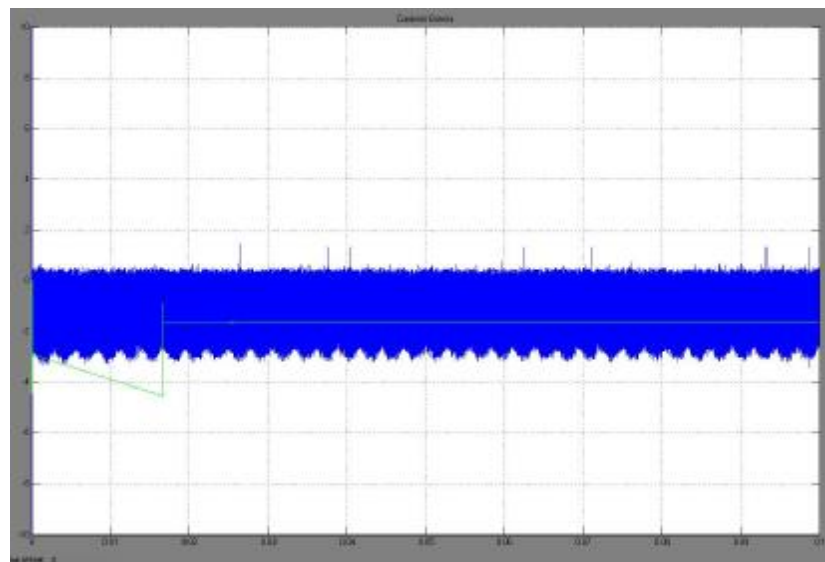


FIGURA 3.35 Corriente en la Batería

Como estaba previsto la corriente de la batería es negativa por lo que ésta se está cargando.

CAPÍTULO 4

4 DISEÑO DE CONTROLADORES DIGITALES

En la actualidad existen un sinnúmero de procesos que demandan estabilidad, eficiencia y efectividad por lo que, se vuelve necesario la implementación de un control; y dada la versatilidad y ventajas que muestra el control digital, se presenta como la primera y mejor opción.

4.1 Principio de funcionamiento

Existen dos formas de realizar el control de un sistema, mediante un Control Análogo o Digital. En el caso del Control Análogo la realización del diseño depende de conocer el comportamiento exacto del sistema a controlar. Mientras que, en el Control Digital también se debe conocer al sistema, pero se puede modelar de forma ideal para obtener un diseño que permite realizar un control de estado estable.

Físicamente el Control Análogo posee un mayor tamaño que el Digital, ya que el funcionamiento de este último corresponde al uso de Microcontroladores, Microprocesadores o Procesadores de Señales Digitales (DSP).

Como principal ventaja, los Controladores Digitales permiten realizar fácilmente cambios en su diseño, según se necesite; algo que no ocurre en los análogos en los que se debe volver a diseñar.

Dados los antecedentes, se resolvió para este proyecto utilizar un Control Digital basado en un Procesador de Señales Digitales (DSP), el cual es un sistema que permite realizar cálculos y procesos con variables discretas para lo que previamente transforma las variables análogas (Tiempo Real) en el mundo discreto. Para este procesamiento se define un tiempo en el que la señal es muestreada, debiendo ser siempre menor que la frecuencia del sistema a controlar. Este tiempo se conoce como Tiempo de Muestreo (T_s) y es el que garantiza una mejor resolución de la señal y por ende un procesamiento más confiable.

Como se muestra en la figura 4.1, en la arquitectura de un lazo de control se debe comparar la variable a controlar $y(t)$ con una señal continua de referencia (r_k), generando una señal también continua

($y(t)$), que se realimenta, cerrando el lazo de control, en el que previamente se haya garantizado la estabilidad. [22]

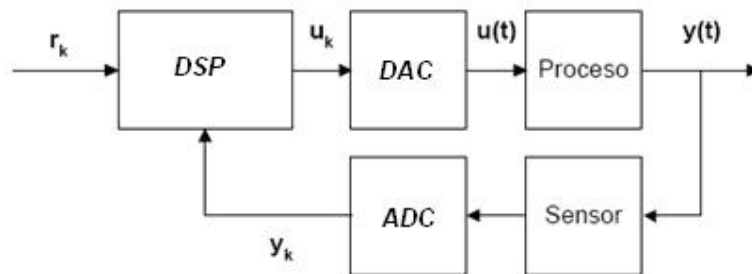


FIGURA 4.1 Lazo típico de Control.

4.2 Ventajas y Desventajas

Existen varias ventajas en utilizar procesadores de señales digitales (DSP) con respecto a controladores tradicionales, entre las cuales podríamos citar:

- Mayor Confiabilidad y Flexibilidad
- Optimización de procesos y disminución pérdidas de datos
- Utilizan plataformas de programación sencillas con instrucciones ya definidas (Ejemplo: Lenguaje C, Ensamblador)
- Mayor Rapidez de procesamiento
- Mejor control de las señales por el tipo de aritmética utilizada
- Mayor Precisión y Exactitud
- No existe límite en la complejidad de los algoritmos

- Escalabilidad: Simplifica los cambios y ajustes en el control
- Tecnología VLSI (Very Large Scale Integration): Permite diseñar sistemas con capacidad para ejecutar procesamiento de varias señales en tiempo real.

A pesar de estas ventajas presentadas, existen algunos inconvenientes que deben considerarse previo a la selección de una plataforma para el procesamiento de señales:

- Para garantizar una mayor precisión y exactitud, se requiere una señal de entrada lo mas pura posible.
- Pese al gran nivel de exactitud, siempre existirá un mínimo de diferencia entre la señal adquirida y la procesada, lo que se debe considerar previo al análisis correspondiente.
- El tiempo de muestreo es crítico por guardar una relación directa con la fidelidad y depende del grado de precisión del controlador seleccionado. [22]

4.3 Procesador digital de Señal (DSP)

La funcionalidad de un DSP radica en el procesamiento de datos de forma digital, el cual simplifica los cálculos enormemente. De

acuerdo al fabricante, los periféricos que permiten esta funcionalidad varían, pudiendo ser: ADC, Salidas PWM, etc.

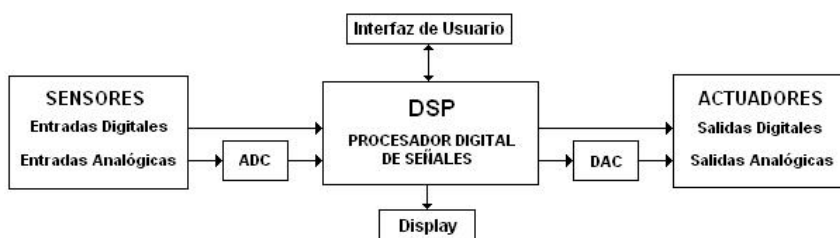


FIGURA 4.2 Diagrama de Bloques de un sistema de Procesamiento Digital

En cuanto a la interfaz con el usuario, actualmente se han desarrollado plataformas gráficas que permiten una mayor facilidad en la implementación de procesos complejos. Se puede apreciar en la Tabla 4.1 que existen diferentes fabricantes de DSP, los cuales proporcionan diferentes características según el tipo de procesamiento que se requiera.[23]

Fabricante	DSP 16 bits	DSP 24 bits	DSP 32 bits
Analog Devices	ADSP-2100 ADSP-21espxx		ADSP-21020 ADSP-2106x
Hitachi	SH-DSP		
Motorola	DSP561xx DSP568xx	DSP5600x DSP563xx	DSP96002
NEC	μ PD7701		
SGS-Thomson	D950		
Texas Instruments	TMS320C1x TMS320C2xx TMS320C5x TMS320C6x TMS320C8x		TMS320C3x TMS320C4x
Zilog	Z893xx Z894xx		

TABLA 4.1 Principales DSP, Fuentes: Revista EDN, May 1997, pagina 44

4.3.1 Ventajas sobre Microcontroladores

A continuación se presentaran las principales diferencias comparativas entre los DSP y los Microcontroladores típicos:

	MICROCONTROLADOR	DSP
ESTRUCTURA DE MEMORIA	Posee una memoria lineal, donde almacena datos e instrucciones de programa, esto limita el tamaño de los programas para que no haya una sobre escritura de datos por instrucción o viceversa.	Posee dos bloques independientes de memoria, con su respectivo bus de acceso, permitiendo al procesador ir a buscar la siguiente instrucción y dato en el mismo ciclo de reloj (Fetch)
UNIDADES DE EJECUCIÓN	Unidad Lógica Aritmética (ALU) para el procesamiento de operaciones internas y no realiza operaciones en paralelo.	Posee: ALU, y un Bloque de Multiplicación y Acumulación (MAC). Realiza operaciones en paralelo, por ende opera funciones más complejas.

TABLA 4.2 Comparación Microcontrolador Vs. DSP

En la actualidad se está desarrollando con mayor frecuencia aplicaciones mezclando las funcionalidades de un microcontrolador con las de un DSP, por lo que los fabricantes de microcontroladores buscan integrar características de los DSP, principalmente la de ejecución de operaciones en paralelo; mientras que los fabricantes de DSP empiezan a utilizar características de los Microcontroladores como ADC, puertos digitales I/O, bloques PWM, buscando su integración como parte fundamental de la estructura del DSP.

[22]

4.3.2 La Familia TMS320C2000

El fabricante TEXAS INSTRUMENT ha centrado el desarrollo de sus productos en tres grandes familias que están orientadas a los diferentes tipos de mercado: TMS320C2000, TMS320C5000 y TMS320C6000. [23]

Como parte de este proyecto se usó el procesador de la familia TMS320C2000, que son los de menor costo y se utilizan para aplicaciones de control de procesos industriales que requieren un procesamiento complejo de datos y un tiempo de respuesta bajo (Ejemplo: Control de Motores).

La familia de procesadores TMS320C2000 se caracteriza por:

- Poseer un compilador de lenguaje C más eficiente en la industria para los procesadores de 32 bits.
- Interrupciones con tiempo de respuesta rápida.
- Instrucciones para optimizar rendimiento y eficiencia de código.

- Modulo para código de seguridad con contraseña de protección de 12 bits
- Modulo PWM con precisión de modulación de hasta 150 pulsos por segundo.
- Existen dos categorías: El C28x y C24x:

TMS320C2000		
Parametros	Controlador C28x Punto Fijo	Controlador C24x Punto Fijo
MHz	100-150	40
MIPS	100-150	40
Arquitectura	32 Bit Punto Fijo	18 Bit Punto Fijo
Flash / ROM Memory	32 - 256 KB	12 - 64 KB
RAM	12 - 40 KB	Hasta 5 KB
ADC	12 bit, velocidad 80ns	10 bit, velocidad 375ns
Perifericos	SCI, SPI, dual CAN, McBSP	SCI, SPI, CAN
Controladores	16 PWM, 15 Timer, 56 GPIO, 6 CAP/2 QEP	16 PWM, 4 Timer, 6 CAP/2 QEP
Precios	3,98 - 18,65 dolares	1,99 - 8,83

TABLA 4.3 Cuadro comparativo de las clases de procesador TMS320C2000



FIGURA 4.3 Foto del DSP TMS320F2812

4.3.3 Tarjeta eZdsp

La tarjeta eZdsp™F2812 provee al DSP de conectividad y alimentación para realizar aplicaciones experimentales, desarrollar y correr programas con el DSP de la familia TMS320F2812. Sus características principales son: (ANEXO C)

- Permite la verificación del estado de cada variable del procesador.
- Reloj de 30MHz (Permite la instalación de un Dispositivo de Reloj adicional)
- Utiliza 2 conectores de expansión (Entrada Análogas, Salidas Digitales)
- Voltaje de operación de 5V.



FIGURA 4.4 Foto del eZdsp™F2812

4.4 Herramientas de Matlab

Siendo MATLAB un Software de desarrollo de aplicaciones integrado y, orientado al procesamiento matemático de datos, y conociendo la funcionalidad de la herramienta Simulink para el control de procesos, se lo escogió para el desarrollo del proyecto. A continuación se presenta los toolboxes que se utilizaron para simular el sistema y programar el DSP.

4.4.1 Simulink

En Simulink se puede encontrar una amplia biblioteca de Bloques de Dispositivos de Salida, Fuentes, Componentes Lineales, No Lineales y Conectores. También permite diseñar bloques para aplicaciones específicas. [21]

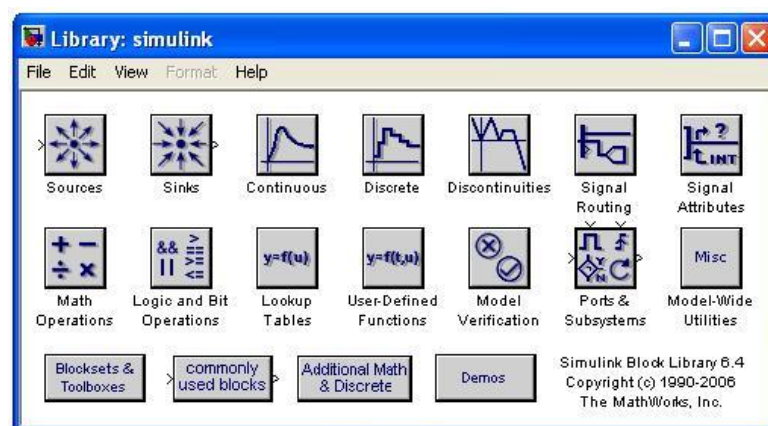


FIGURA 4.5 Librerías Simulink

4.4.2 PLECS

PLECS (Piece-Wise Linear Electrical Circuit Simulation) es una librería de Simulink para simular circuitos eléctricos y electrónicos dentro de la plataforma de Simulink.

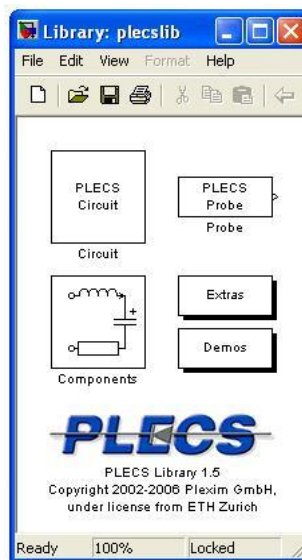


FIGURA 4.6 Librería PLECS

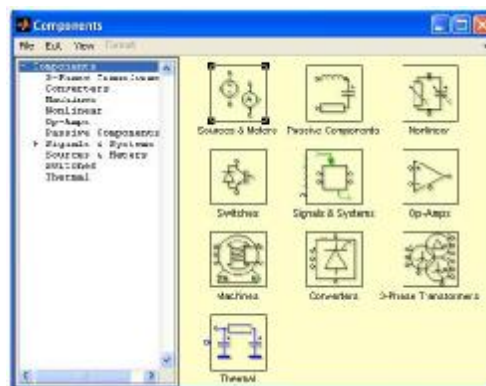


FIGURA 4.7 Bloques de Componentes de PLECS

4.4.3 Target for TI C2000

Es una librería creada por la Texas Instrument Express DSP para funcionar en MATLAB, específicamente para aplicaciones en la plataforma de Simulink, que permite programar los DSP independientemente de la familia.

Para la programación del DSP, es necesario tener el Software Code Composer Studio, el que realiza la codificación del Modelo en Lenguaje C.



FIGURA 4.8 Code Composer Studio

Los bloques del Toolbox Target para TI C2000 se pueden dividir en tres grupos:

- Bloques Generales: Se utilizan para la configuración del dispositivo DSP que se va a utilizar

- Bloques de Soporte: Se utilizan para configurar los periféricos de entrada y salida del dispositivo.
- Bloques Optimizados: Realizan operaciones matemáticas y otras mas específicas, y en combinación con los bloques básicos de Simulink permiten modelar el control que se quiera implementar en el DSP.

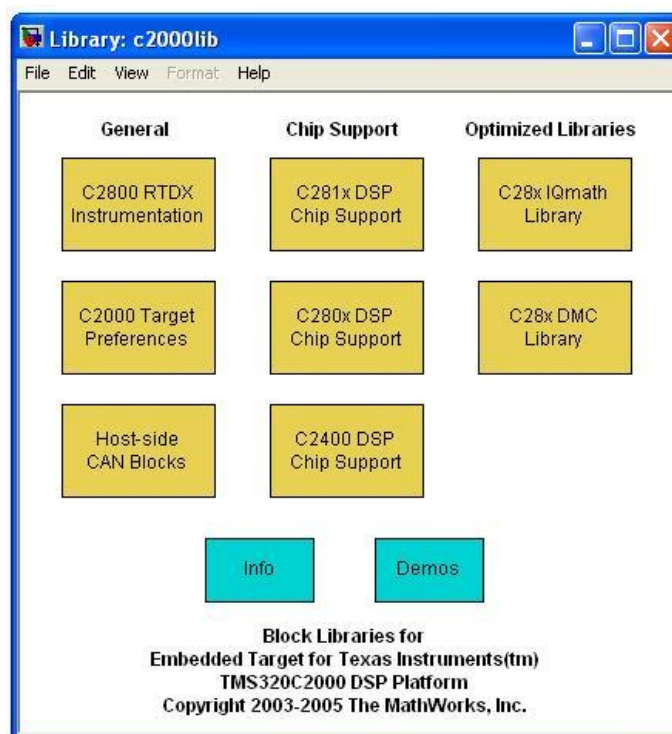


FIGURA 4.9 Librerías del Target para TI C2000

4.5 Diseño del Controlador para un UPS Línea Interactiva

El controlador propuesto en este capítulo no se implementará en Hardware sino solamente en simulación, ya que implicaría un

análisis exhaustivo del ruido del sistema y de los transientes, por lo que se lo podría proponer para un proyecto futuro.

Para el diseño del controlador del UPS de Línea Interactiva se trabajará con su modo de operación más importante y crítico: Modo Rectificador, siendo la corriente DC la que se controle, ya que según su dirección define el modo de operación del convertidor trifásico.

4.5.1. Especificaciones

En el capítulo 3 se hizo el análisis en detalle de los modos de operación del convertidor y las funciones de transferencia que definen la planta. La figura 3.22 corresponde al esquemático del circuito en Modo Rectificador, para el cual se definieron las siguientes relaciones:

$$\frac{I_{dMOD}}{V_{dMOD}} = \frac{\frac{1}{L}}{s + \frac{R}{L}} \quad (4.1) \quad \frac{I_{qMOD}}{V_{qMOD}} = \frac{\frac{1}{L}}{s + \frac{R}{L}} \quad (4.2)$$

$$\frac{I_{dMOD}}{I_{DC}} \approx \frac{2}{3} \frac{V_{DC}}{V_S} \quad (4.3)$$

Las ecuaciones 4.1 y 4.2 determinan el comportamiento de la planta en función de los parámetros previamente calculados.

$$L = 1.160[mH]; R = 0.102[\Omega]; V_{DC} = 96[V]; V_s = 50[V_{RMS}]$$

Reemplazando:

$$\frac{I_{dMOD}}{V_{dMOD}} = \frac{862.1}{s + 87.93} \quad (4.4)$$

$$\frac{I_{qMOD}}{V_{qMOD}} = \frac{862.1}{s + 87.93} \quad (4.5)$$

4.5.2. Modelación

Con la obtención de una Función de Transferencia aproximada, se procederá con la utilización de la herramienta de MATLAB, denominada SISOTOOL, para luego del ingreso de la función de transferencia obtener de forma automática el cálculo del control de lazo cerrado de la planta.

```

Command Window
>> Plant=tf([862.1],[1 87.93])

Transfer function:
  862.1
-----
s + 87.93

>> Plant

Transfer function:
  862.1
-----
s + 87.93

>> sisotool(Plant)

```

FIGURA 4.10 Ingreso de la función de Transferencia en SISOTOOL

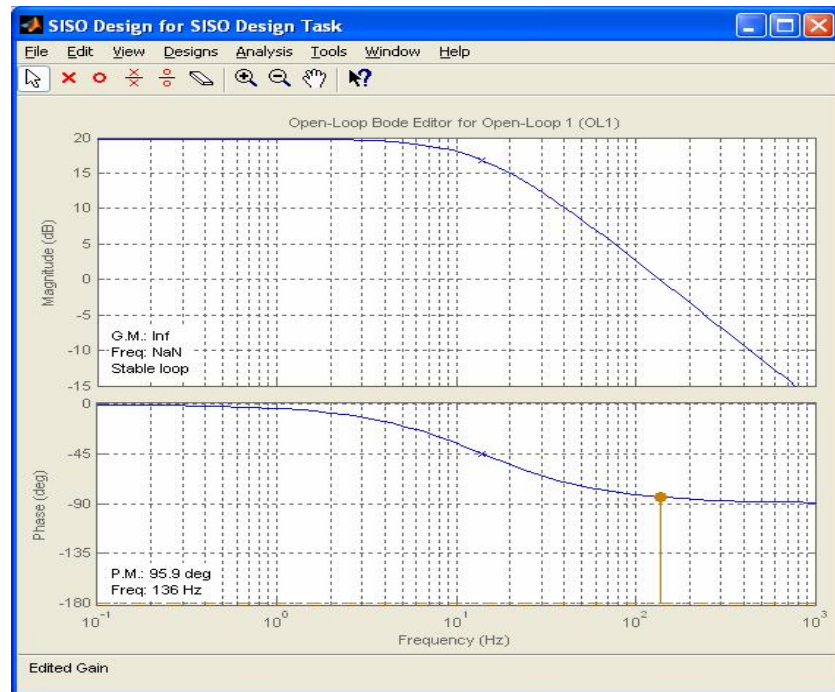


FIGURA 4.11 Diagrama de BODE de magnitud y fase del sistema del Lazo abierto

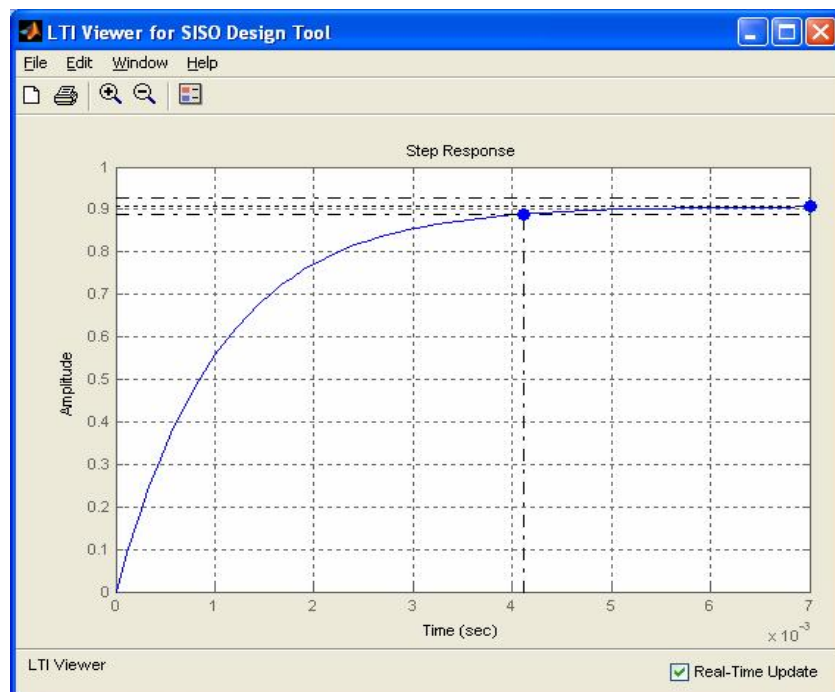


FIGURA 4.12 Tiempo de estabilización

En lazo abierto se obtiene: Margen de Fase $PM = 95.9^\circ$, Frecuencia de Corte $Freq = 136Hz$ y Tiempo de Estabilización $T_s = 4.12ms$. Se procede al cálculo del compensador:

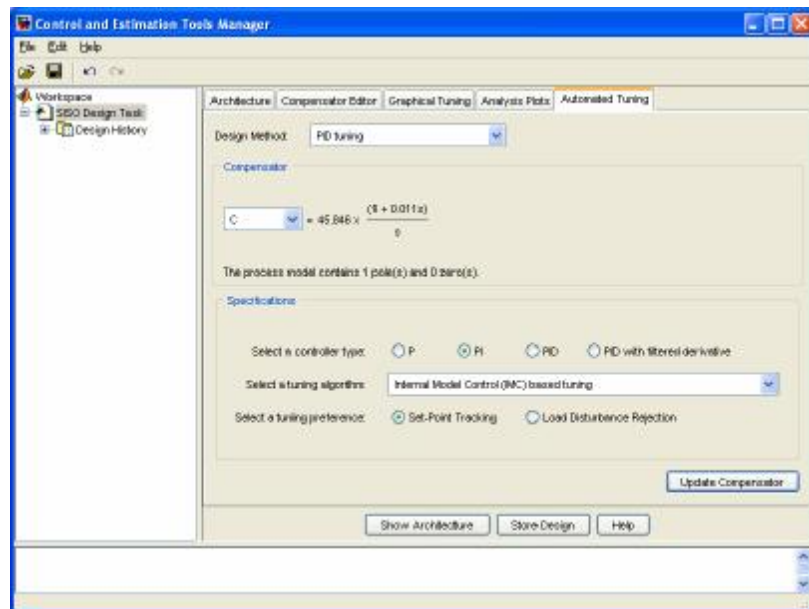


FIGURA 4.13 Cálculo del compensador

Una vez obtenido el compensador, se obtiene del sistema: Margen de Fase $PM = 90^\circ$, Frecuencia de Corte $Freq = 71.5Hz$ y Tiempo de Estabilización $T_s = 8.87ms$. Como se necesita un control a mayor frecuencia (menor tiempo de respuesta), se ajusta la ganancia de lazo cerrado para obtener una frecuencia de $1.KHz$.

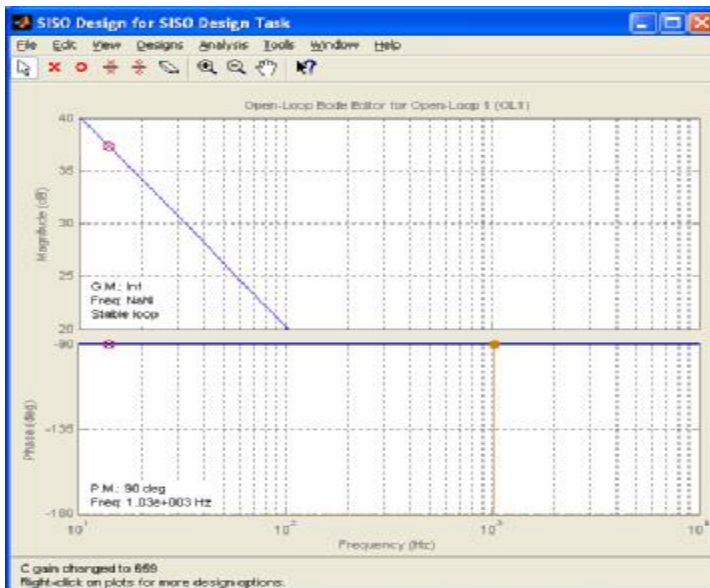


FIGURA 4.14 Diagrama de BODE de magnitud y fase en Lazo cerrado

El compensador obtenido es: $G_c(s) = 658.84 \frac{1+0.011s}{s}$ (4.6)

Se disminuye el tiempo de estabilización a 0.6ms.

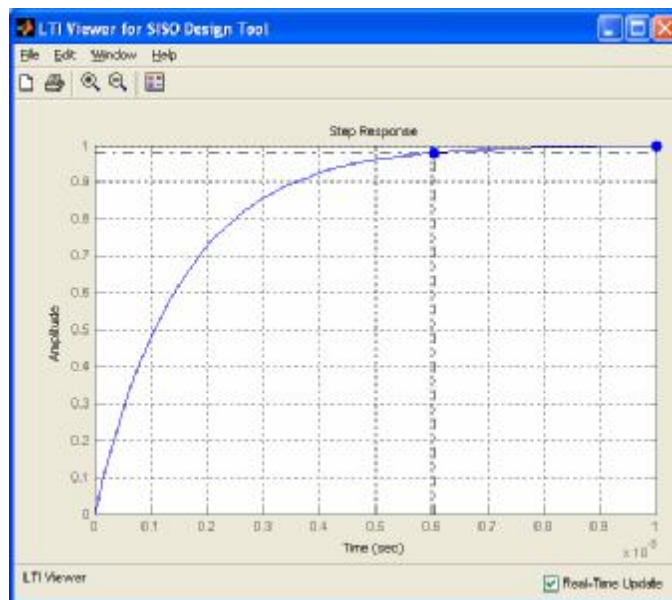


FIGURA 4.15 Tiempo de Estabilización en Lazo cerrado

4.5.3. Simulaciones

Para la simulación de la operación del UPS se procede a la implementación del controlador diseñado con la herramienta SISOTOOL.

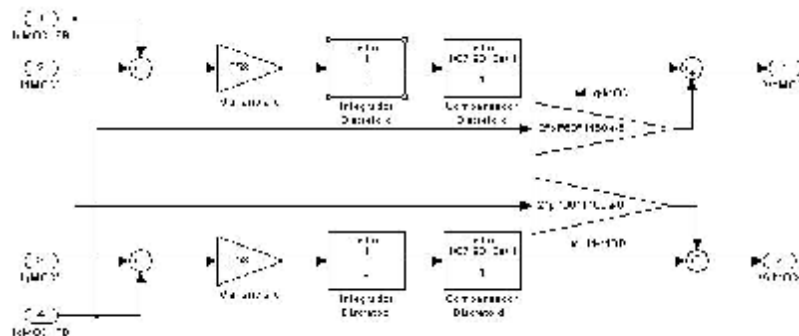


FIGURA 4.16 Compensador PI VMOD / IMOD

El controlador se aplica a la Planta Real y a la Teórica, con el propósito de establecer un análisis comparativo de las señales de salida.

Se considera los dos modos de operación del UPS mediante un control de la corriente DC, ya que de acuerdo a la ecuación 4.3 se define la relación entre la I_{DC} y la I_{dMOD} (Bloques de Ganancia Naranja), permitiendo el control de la corriente del convertidor tomando como referencia la corriente DC.

- $I_{DC} > 0 \Rightarrow$ MODO INVERSOR
- $I_{DC} < 0 \Rightarrow$ MODO RECTIFICADOR

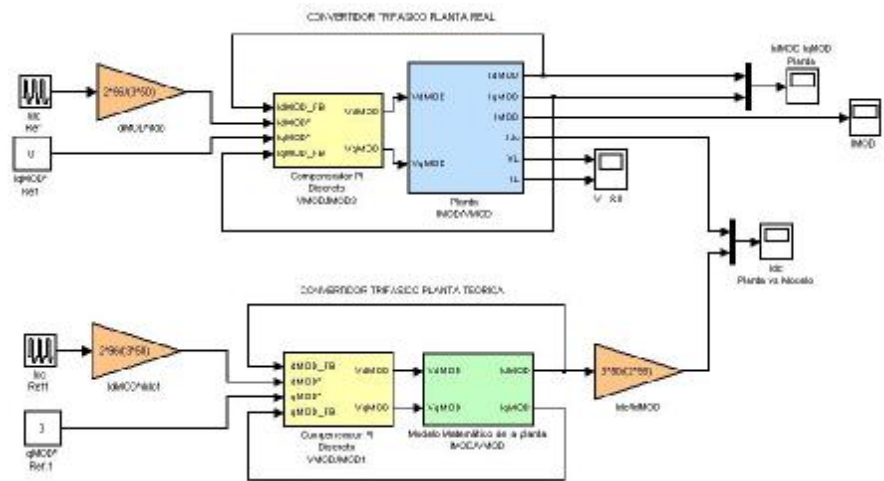


FIGURA 4.17 Simulación del UPS de Línea Interactiva

El Modelo matemático de la Planta (Bloque Verde) se definió según las ecuaciones 4.4 y 4.5, y se implementa utilizando la herramienta de SIMULINK.

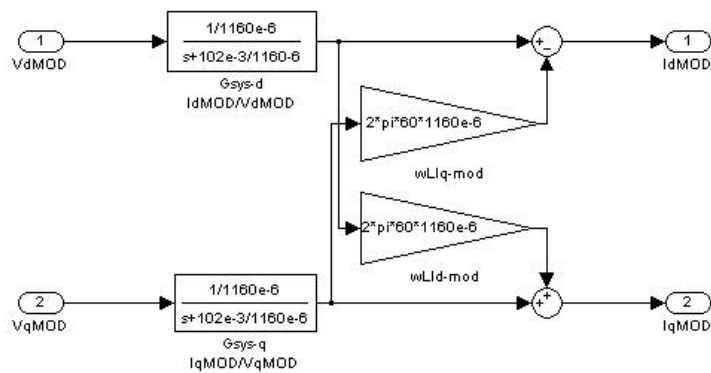


FIGURA 4.18 Planta en Modelo Matemático del UPS

En la Figura 4.18 se presenta el Diagrama de Bloques de la Planta Real (Bloque Celeste).

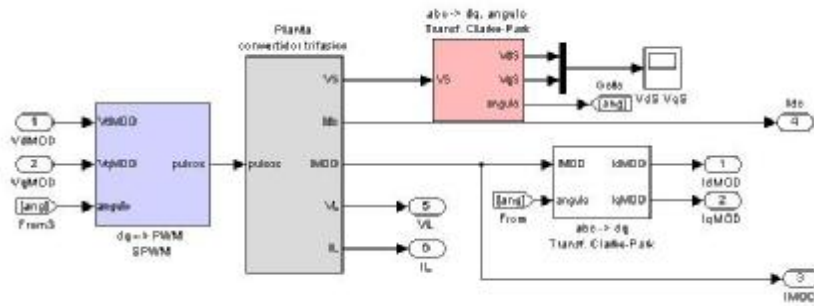


FIGURA 4.19 Planta Real del UPS

Y está compuesta por:

- Bloque SPWM (dq → PWM): Está conformado por los Bloques: Inversa de Transformada de Park (dq → ab), Generador Sinusoidal (ab → abc) y Generador PWM (abc → PWM).

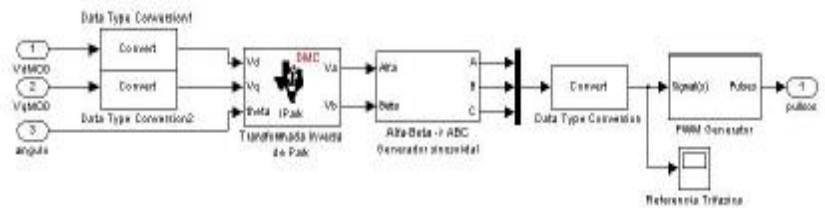


FIGURA 4.20 Bloque PWM Sinusoidal

- Convertidor Trifásico: Define el Convertidor Trifásico descrito en el capítulo anterior.

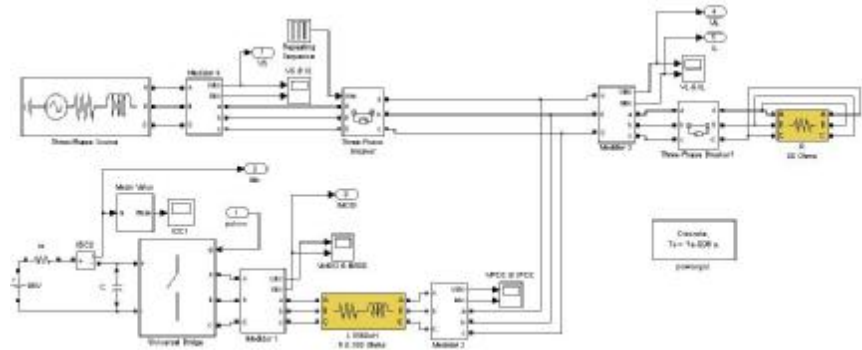


FIGURA 4.21 Convertidor Trifásico

- Transformada Clark/Park ($abc \rightarrow dq$): Conformado por los Bloques: Transformada de Clark ($abc \rightarrow ab$) y Transformada de Park ($ab \rightarrow dq$). Existe también un bloque detector de frecuencia y fase, que servirá de referencia para todas las transformadas.

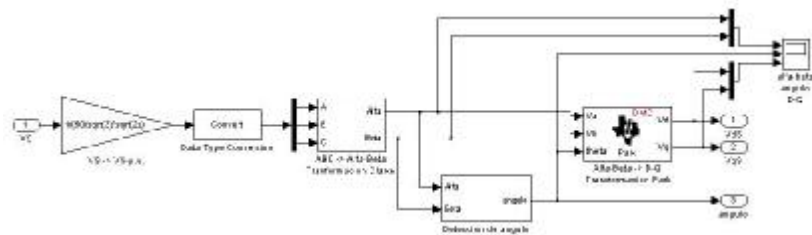


FIGURA 4.22 Transformada de Clark / Park $abc \rightarrow dq$

Para efecto de la simulación se consideran los siguientes eventos y modos de operación:

EVENTO	MODO DE OPERACIÓN UPS
Falla en la Alimentación	Entrega de potencia a la Carga (MODO INVERSOR)
Reestablecimiento de Energía	Recarga de la Batería (MODO RECTIFICADOR)

TABLA 4.4 Operación UPS para simulación

Según el evento se analizarán las variables definidas en la figura 3.16 del capítulo anterior:

- Corriente DC I_{DC}
- Corriente Modulada I_{MOD}
- Voltaje Trifásico en la Carga R_L (V_L)
- Corriente Trifásico en la Carga R_L (I_L)

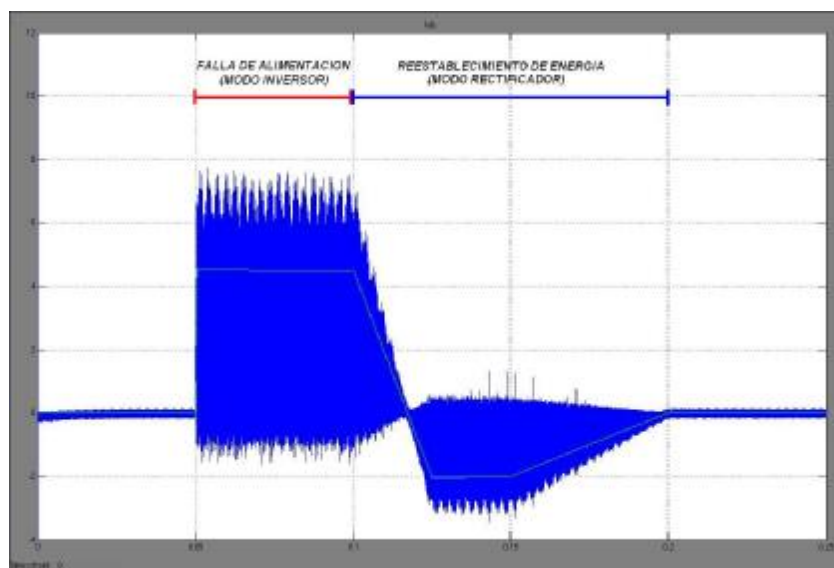


FIGURA 4.23 Corriente DC

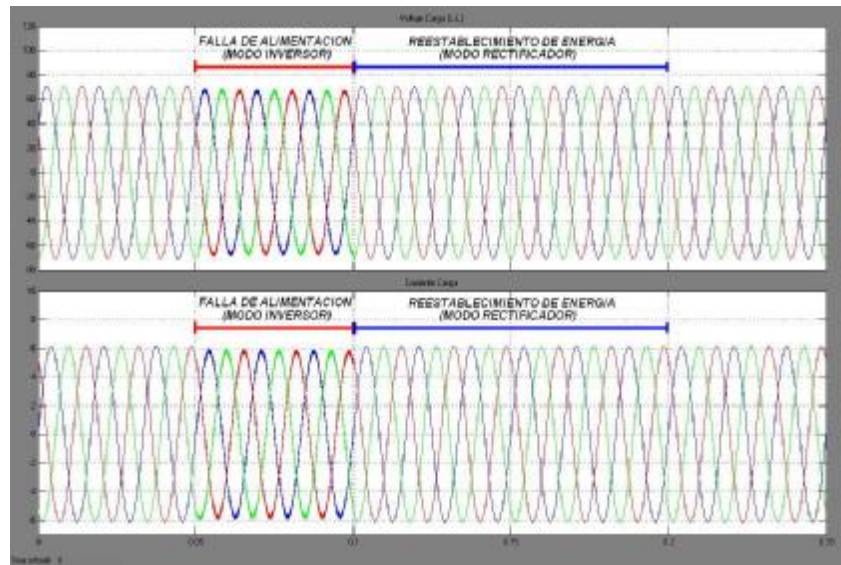


FIGURA 4.24 Voltajes y Corrientes en la Carga

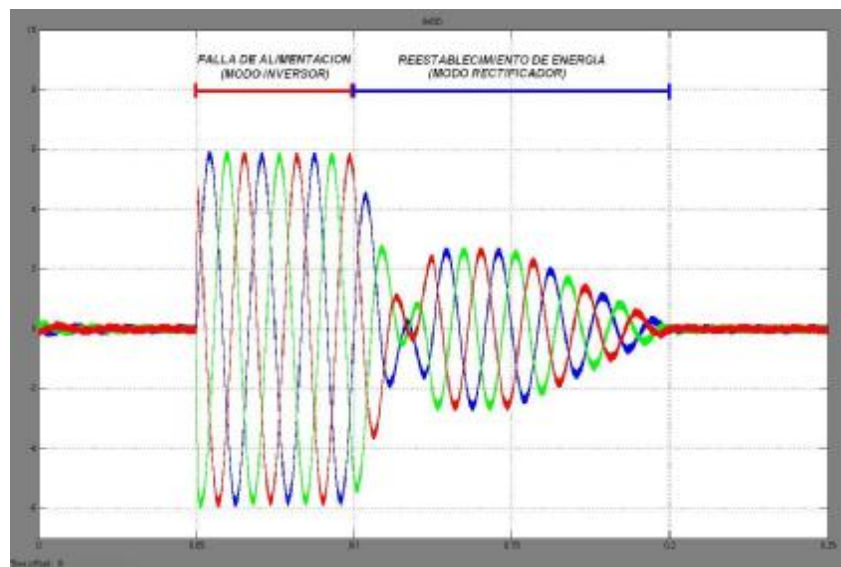


FIGURA 4.25 Corriente en el Inductores

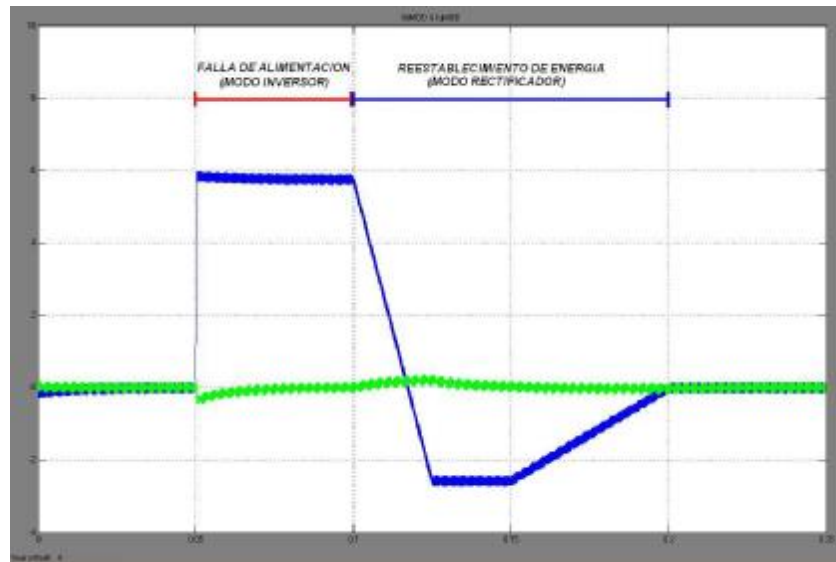


FIGURA 4.26 Corriente de en el Inductor (Transformado Vector dq)

4.6 Implementación en el DSP TMS320F2812

Para la implementación física y correcta operación del UPS de Línea Interactiva se debe tomar las siguientes consideraciones:

- DSP: Exige que todas las señales que ingresen sean totalmente puras, es decir libres de ruido; y,
- Modulo Convertidor: Por su diseño presenta limitaciones en la frecuencia de operación.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se resolvió para el propósito de este proyecto trabajar de forma independiente los dos

modos de operación del Convertidor, realizando un control de lazo abierto.

Para complementar la implementación de los modos de operación fue necesario el diseño de dos circuitos electrónicos:

- Circuito de Adquisición de Datos: Permite acondicionar la señal trifásica adquirida para ingresarla al DSP.
- Circuito de Aislamiento: Permite aislar el Circuito de Control del de Fuerza.

4.6.1. Herramientas Utilizadas

Los bloques utilizados para la programación del DSP fueron:

- F2812 eZdsp: Sirve configurar el DSP a utilizar.
- ADC: Convertidor Análogo – Digital.
- PWM: Generador PWM.
- Transformada de Park Inversa: Conversión $dq \rightarrow ab$.
- Transformada de Park: Conversión $ab \rightarrow dq$.
- Generador de Rampa.
- Float to IQN: Transforma Datos Float a Palabras de 32 bits
- IQN to Float: Transforma Palabras de 32 bits a Datos Float

- IQN x IQN: Multiplica palabras del mismo tamaño.
- IQN / IQN: Divide palabras del mismo tamaño.
- IQN1 x IQN2: Multiplica palabras de diferente tamaño.
- Trig Fcn IQN: Funciones Trigonómicas.
- IQN1 to IQN2: Transforma palabras de un tamaño a otro.

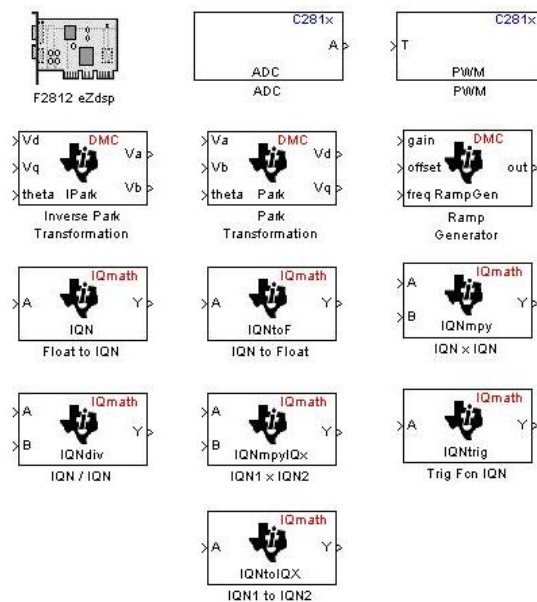


FIGURA 4.27 Bloques de la Librería TI C2000 utilizados

4.6.2. Programa para Implementación

La Figura 4.27 corresponde al programa que se cargará en el DSP para operar al convertidor en MODO INVERSOR.

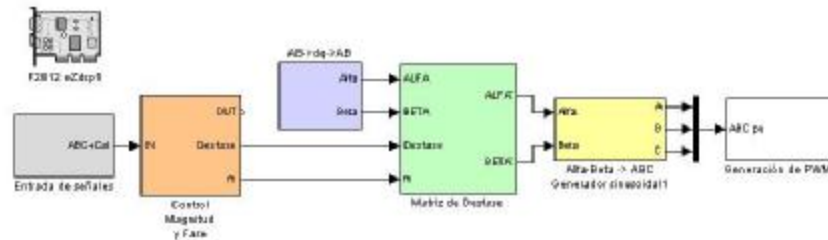


FIGURA 4.28 Programa MODO INVERSOR

Los bloques utilizados son:

- Entrada de Señales (Bloque Color Gris):

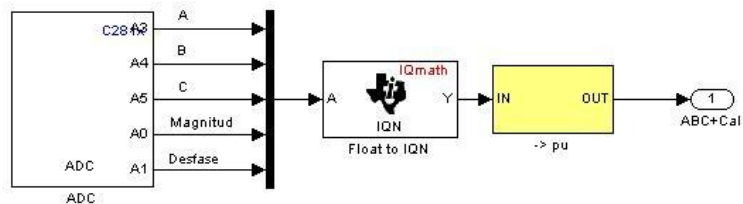


FIGURA 4.29 Entrada de Señales

Compuesto por los siguientes Bloques:

- I. Bloque Convertidor Analógico - Digital: Adquiere las señales de Magnitud y Fase, junto con las trifásicas.
- II. Bloque Float to IQN: Transforma el tipo de dato de tipo Float a una palabra de 32 bits.
- III. Bloque de adecuación de Señal (Bloque Amarillo): Adecua la señal a un nivel entre 1 y -1.

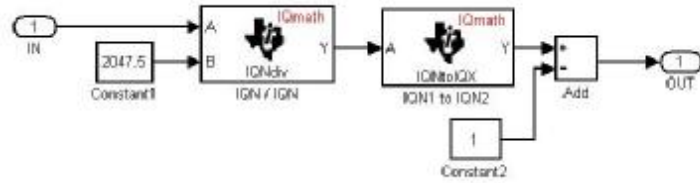


FIGURA 4.30 Adecuación de Señal (Por Unidad)

- Control de Magnitud y Fase (Bloque Color Naranja)

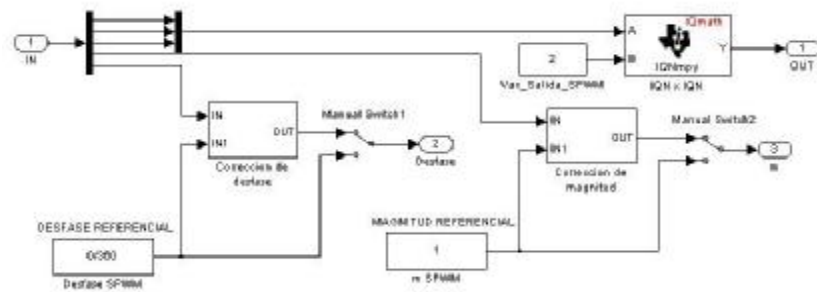


FIGURA 4.31 Control de Magnitud y Fase

- Señal de Referencia (Bloque Lila):

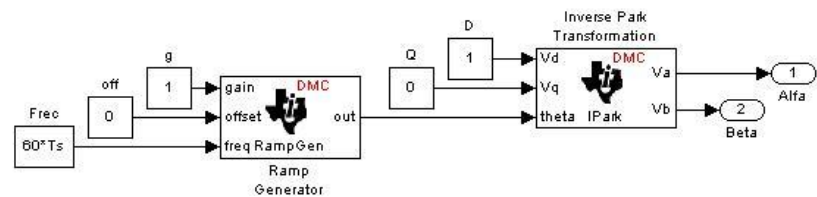


FIGURA 4.32 Control de Magnitud y Fase

Compuesto por los siguientes Bloques:

- I. Generador de Rampa
- II. Transformada de Park Inversa

- Matriz de Desfase (Bloque Verde):

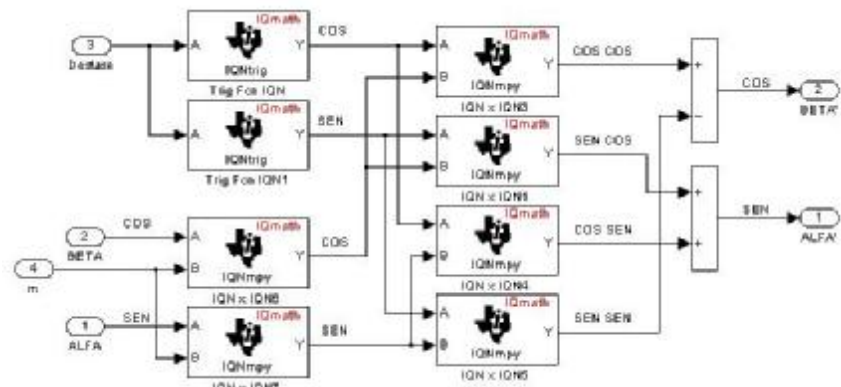


FIGURA 4.33 Matriz de Desfase

Su funcionalidad consiste en desfasar las señales a y b de acuerdo a lo requerido, y su diseño está dado por:

$$\cos(q + d) = \cos(q)\cos(d) - \sin(q)\sin(d) \quad (4.7)$$

$$\sin(q + d) = \sin(q)\cos(d) + \cos(q)\sin(d) \quad (4.8)$$

- Generador Sinusoidal (Bloque Amarillo):

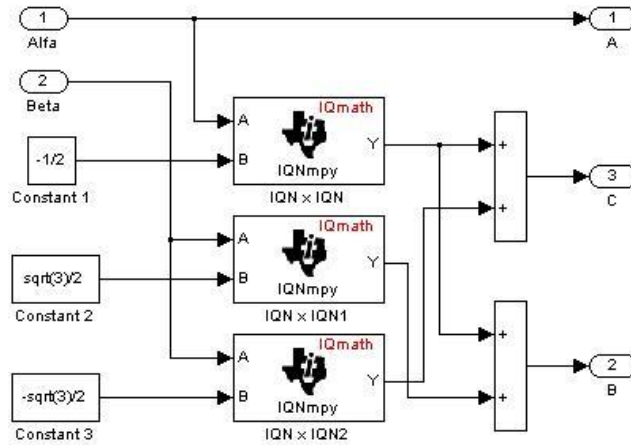


FIGURA 4.34 Generador Sinusoidal

Definida por:

$$A = \text{Sen}(q) \quad (4.9)$$

$$B = \text{Sen}(q + 120^\circ) = -\frac{1}{2}\text{Sen}(q) + \frac{\sqrt{3}}{2}\text{Cos}(q) \quad (4.10)$$

$$C = \text{Sen}(q + 240^\circ) = -\frac{1}{2}\text{Sen}(q) - \frac{\sqrt{3}}{2}\text{Cos}(q) \quad (4.11)$$

- Generación PWM (Bloque Blanco):



FIGURA 4.35 Generación PWM

Compuesto por los siguientes Bloques:

- I. Adecuación de Señal: Deja las señales en porcentaje para enviarlas al bloque modulador.

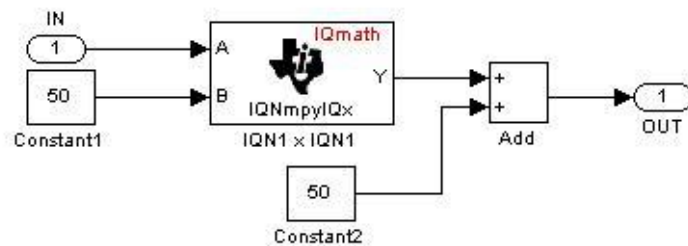


FIGURA 4.36 Adecuación de Señal (Porcentaje)

- II. IQN to Float: Transforma un dato de 32 bits a uno Float
- III. Bloque PWM: Realiza la modulación según una señal de referencia.

Para el MODO RECTIFICADOR tenemos:

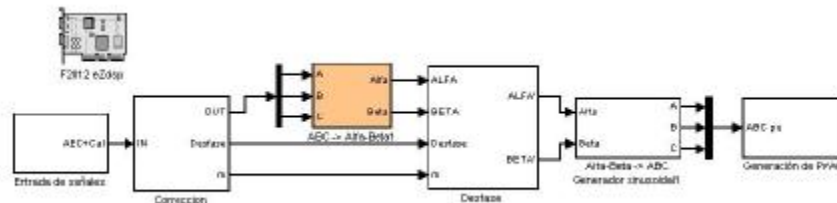


FIGURA 4.37 Programa MODO RECTIFICADOR

La diferencia con el programa anterior es que la señal trifásica corresponde al voltaje adquirido de la red y no a una

referencia, de modo que el V_{MOD} generado estará en función del Voltaje de la red, que en conjunto con la calibración de magnitud y fase hará que el convertidor trabaje como RECTIFICADOR. Los bloques utilizados son:

- Entrada de Señales
- Control de Magnitud y Fase
- Bloque ABC à ab (Bloque Naranja)
- Matriz de Desfase
- Generador Sinusoidal
- Generación PWM

Como se indico la diferencia está en el bloque ABC à ab el cual corresponde con la ecuación 3.45:

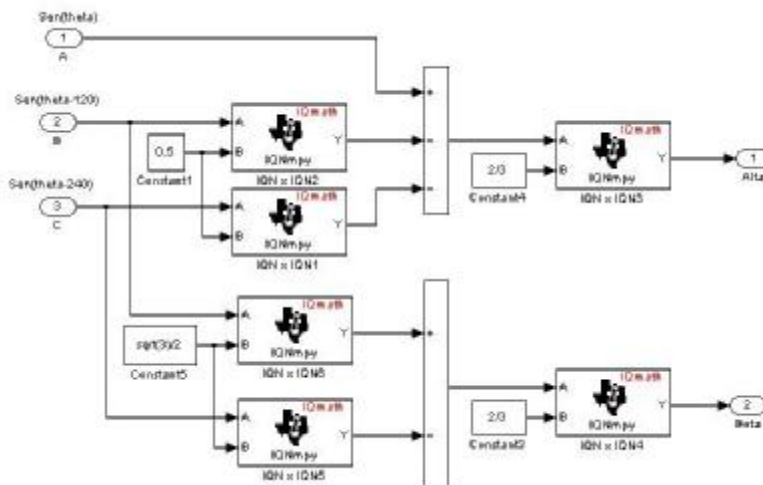


FIGURA 4.38 Bloque ABC à ab

OBSERVACIONES Y RESULTADOS

La revisión de las observaciones se realizará en función de las diferentes etapas del UPS, las cuales se clasifican en:

- I. Diagrama Global de Conexiones del Sistema
- II. Circuito de Acondicionamiento y Control
- III. Circuito de Aislamiento Control – Fuerza
- IV. Fuente DC (Banco de Baterías)
- V. Circuito de Fuerza
- VI. Filtro
- VII. Fuentes de Voltaje: Etapa de Control y Fuerza

I. Diagrama Global de Conexiones del Sistema

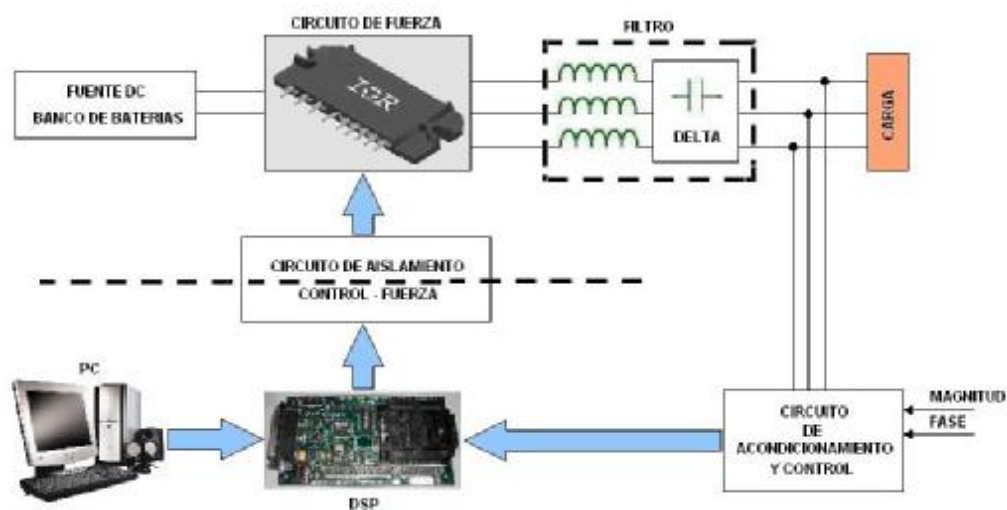


Figura 1: Diagrama Global de Conexiones del Sistema

II. Circuito de Acondicionamiento y Control

La finalidad de este circuito es acondicionar las señales de entrada al DSP:

- Nivel AC: Relación 100V ã 1V (Máxima entrada 110V)
- Nivel DC: 0 ã 1.5V

Obteniendo siempre un Voltaje mayor a 0 y menor a 3V, cumpliendo con las especificaciones del DSP (ANEXO C).

Está conformado por dos etapas:

- Transformadores: En Estrella a la red trifásica, relación: 110:6.
- Circuito Acondicionador: Configuración de OPAMP. (ANEXO B)

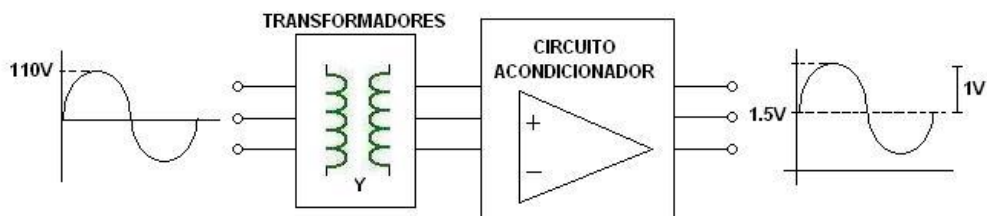


Figura 1: Diagrama del Acondicionador de Señales

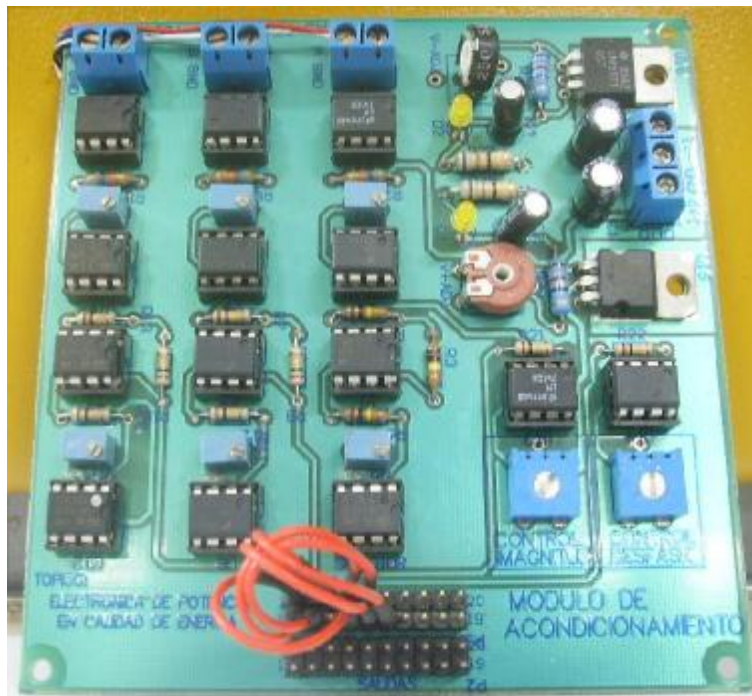


Figura 2: Tarjeta electrónica del Circuito Acondicionador

III. Circuito de Aislamiento Control – Fuerza

Este circuito cumple con la función de aislar el circuito de Fuerza del de Control, mediante la utilización de opto-acopladores digitales evitando así la presencia de ruido en las señales de control que son las que presentan mayor sensibilidad. También se usa un buffer a la salida del opto-acoplador para generar una señal PWM de un nivel de 5V, aumentando así la corriente y acondicionando la señal para la entrada del bloque de Fuerza (ANEXO B).

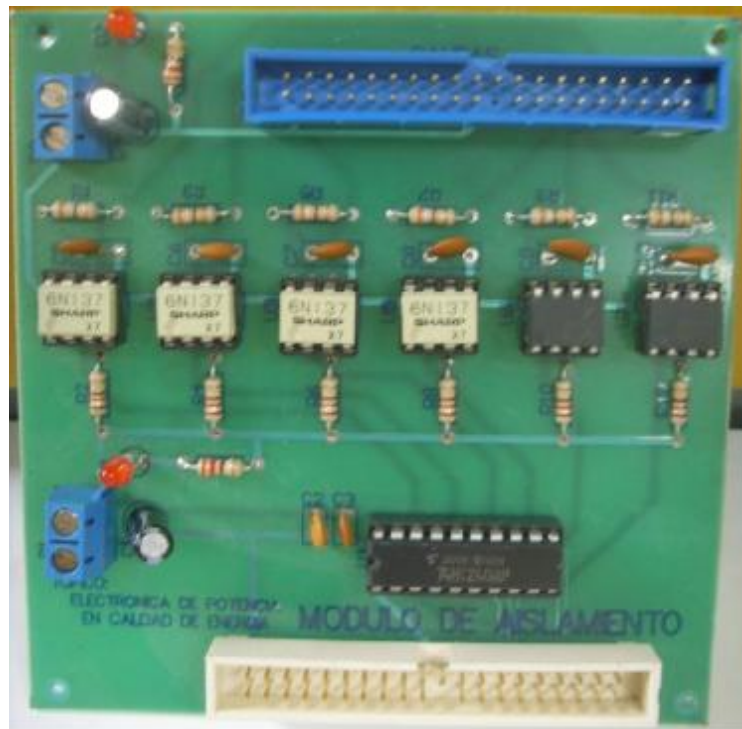


Figura 3: Tarjeta electrónica del Circuito de Aislamiento Control - Fuerza

IV. Fuente DC (Banco de Baterías)

Está conformado por 8 Baterías con una capacidad de 7 Amperios Horas a 12V, alcanzando un total de 96Vdc. (ANEXO C)



Figura 4: Banco de Baterías

V. Circuito de Fuerza

El circuito de fuerza está básicamente constituido por el modulo de IGBT IRAMY20UP60B. También fue necesaria la inclusión de varios filtros capacitivos en el lado DC para eliminar la distorsión en la señal (ANEXO B).



Figura 5: Circuito de Fuerza

V. Filtro

Básicamente es un Banco Trifásico de Inductores y Capacitores dispuesto para conectarlos según se requiera.



Figura 6: Banco de Impedancia L-C

VI. Fuente de Voltaje: Etapa de Control y Fuerza

Para la alimentación se usaron dos fuentes de poder independientes, una de $\pm 12V$ para la etapa de Control y otra de $\pm 12V$ y $\pm 5V$ para la etapa de Fuerza.

Se usaron dos fuentes de computadora, que incluyen en su diseño un Filtro LC, evitando así señales no deseadas entre etapas.

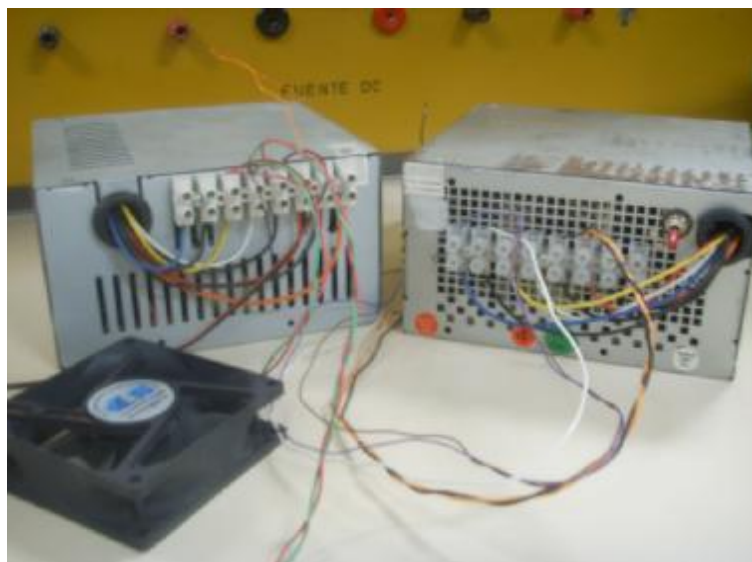


Figura 7: Fuentes de Voltaje DC

En este análisis se utilizaron dos analizadores de redes:

- FLUKE 435: Análisis Trifásico en el lado AC

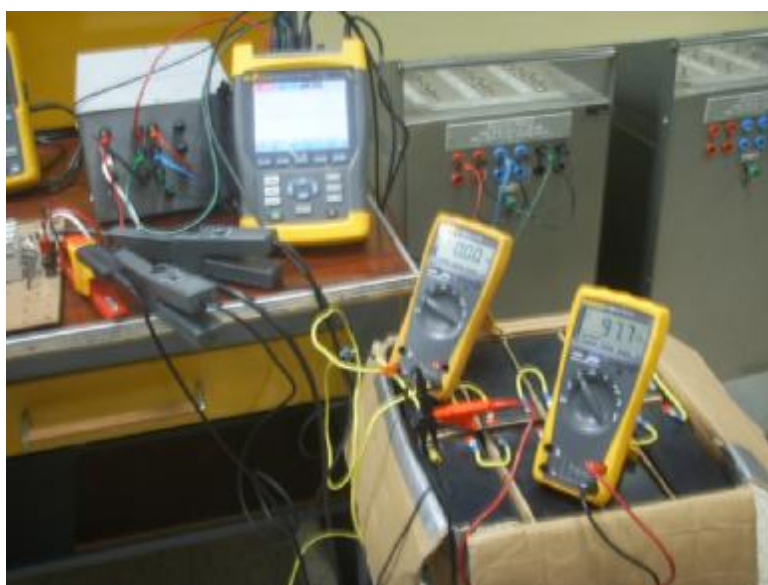


Figura 8: FLUKE 435

- FLUKE 43B: Análisis en el lado DC



Figura 9: FLUKE 43B



Figura 10: Vista General de la Implementación

El análisis de los resultados se mostrará de acuerdo a los dos Modos de Operación del UPS:

MODO INVERSOR

Para este modo de operación la corriente sale de las baterías, alimentando así a la carga con potencia activa

I. Voltajes y Corrientes en el lado DC



Figura 10: Corriente y Voltaje en el lado DC

$$V_{DC} = 96.8[V]$$

$$I_{DC} = 0.25[A]$$

II. Voltajes y Corrientes Trifásico en el lado AC

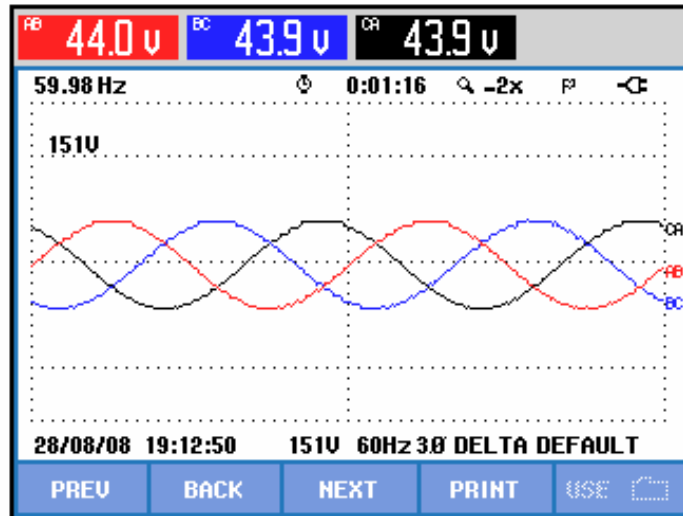


Figura 11: Voltaje AC Trifásico en la Carga

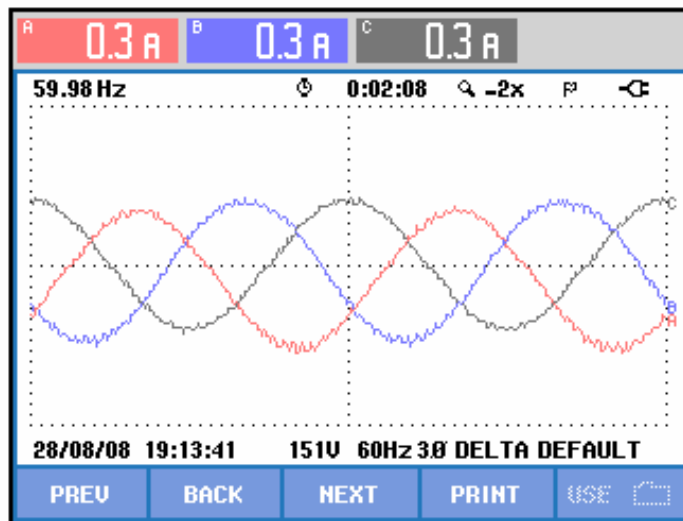


Figura 12: Corriente AC Trifásico en la Carga

III. Potencia Activa, Aparente, Reactiva y Factor de Potencia

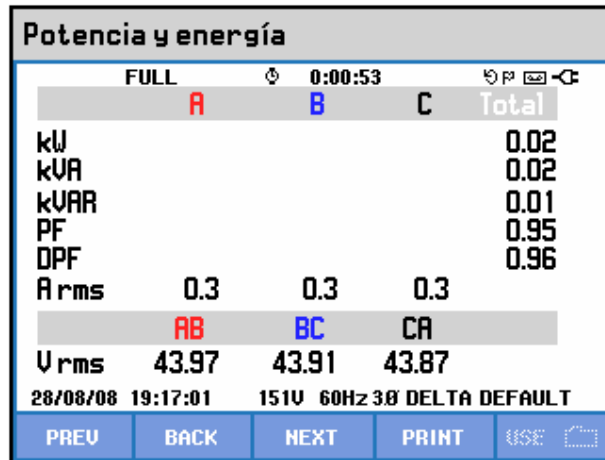


Figura 13: Potencias y Factor de Potencia Trifásica en la Carga

$$P = 20[W]$$

$$Q = 10[VAR]$$

$$S = 20[VA]$$

$$F_p = 0.95$$

IV. Análisis de Armónicos

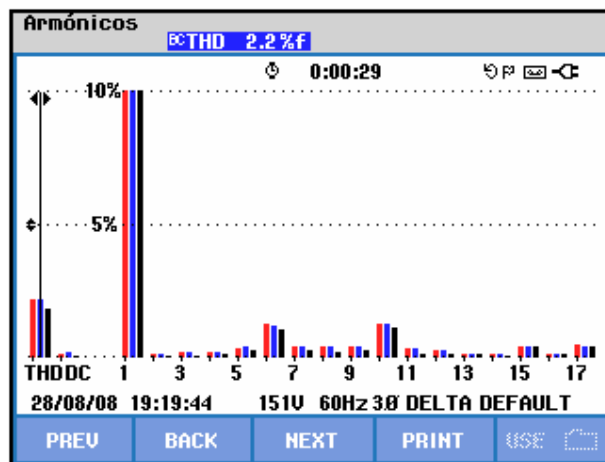


Figura 14: Gráfico de Armónicos de Voltaje

TABLA ARMÓNICOS			
	3s 0:02:30		
Volt	AB	BC	CA
THD%f	2.2	2.2	1.8
H3%f	0.2	0.2	0.1
H5%f	0.4	0.4	0.3
H7%f	0.4	0.4	0.3
H9%f	0.4	0.4	0.3
H11%f	0.3	0.3	0.2
H13%f	0.2	0.2	0.1
H15%f	0.4	0.4	0.4
28/08/08 19:21:44 151V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT			
PREV	BACK	NEXT	PRINT USE

Figura 15: Detalle de Armónicos de Voltaje

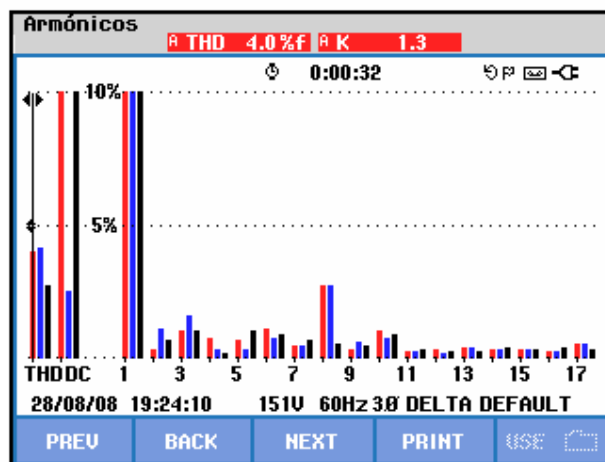


Figura 16: Gráfico de Armónicos de Corriente

TABLA ARMÓNICOS			
	3s 0:00:05		
Amp	A	B	C
THD%f	4.0	4.0	2.8
H3%f	1.0	1.6	1.0
H5%f	0.7	0.3	1.0
H7%f	0.5	0.5	0.7
H9%f	0.4	0.6	0.5
H11%f	0.3	0.3	0.3
H13%f	0.4	0.4	0.2
H15%f	0.4	0.3	0.3
23/07/08 21:01:06 87V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT			
PREV	BACK	NEXT	PRINT USE

Figura 17: Detalle de Armónicos de Corriente

$$\%THD_{VOLTAGE} = 2.1$$
$$\%THD_{CORRIENTE} = 3.6$$

De acuerdo a estos resultados se puede calcular la eficiencia del convertidor en base a la relación de Potencia de Entrada y Salida.

$$V_{DC} = 96.8[V]$$

$$I_{DC} = 0.25[A]$$

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC}$$

$$P_{DC} = 24.2[W] \rightarrow \text{Potencia de Entrada}$$

$$P_{AC} = 20[W] \rightarrow \text{Potencia de Salida}$$

$$h = \frac{P_{SALIDA}}{P_{ENTRADA}} * 100\%$$

$$h = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} * 100\%$$

$$\boxed{h = 82.64\%}$$

MODO RECTIFICADOR

Para este modo de operación la corriente entra a la batería, con el fin de cargarla.

I. Voltajes y Corrientes en el lado DC



Figura 18: Corriente y Voltaje en el lado DC

$$V_{DC} = 107.3[V]$$

$$I_{DC} = 1.73[A]$$

II. Voltajes y Corrientes Trifásico en el lado AC

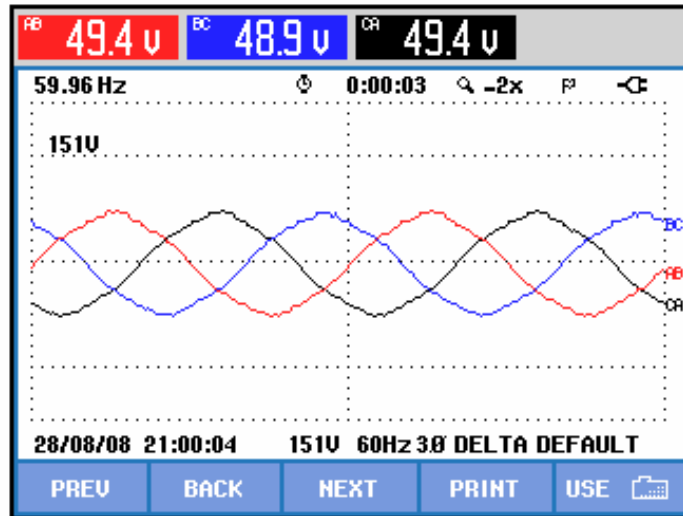


Figura 19: Voltaje AC Trifásico en la Carga

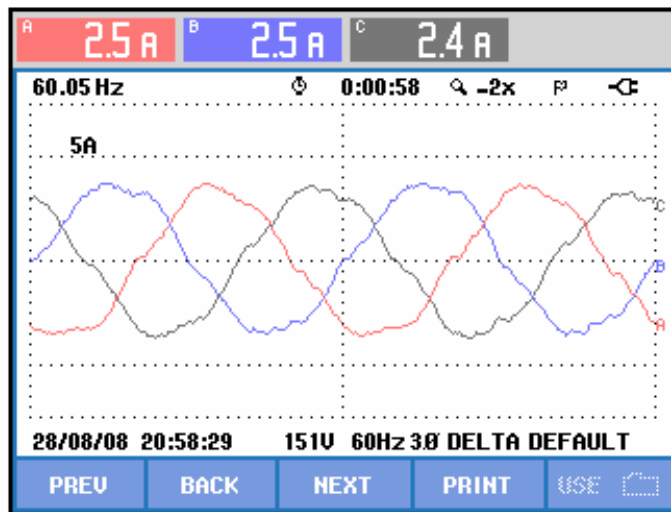


Figura 20: Corriente AC Trifásico en la Carga

III. Potencia Activa, Aparente, Reactiva y Factor de Potencia



Figura 21: Potencias y Factor de Potencia Trifásica en la Carga

$$P = 210[W]$$

$$Q = 10[VAR]$$

$$S = 210[VA]$$

$$F_p = 1$$

IV. Análisis de Armónicos

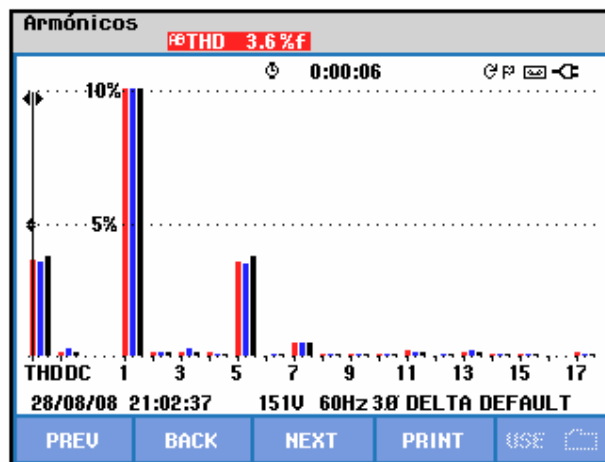


Figura 22: Gráfico de Armónicos de Voltaje

TABLA ARMÓNICOS			
Volt	AB	BC	CA
THD%f	3.7	3.6	3.8
H3%f	0.2	0.3	0.2
H5%f	3.6	3.5	3.8
H7%f	0.5	0.5	0.5
H9%f	0.1	0.1	0.1
H11%f	0.2	0.1	0.2
H13%f	0.2	0.2	0.1
H15%f	0.1	0.1	0.1

28/08/08 21:04:24 151V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT

PREV BACK NEXT PRINT USE

Figura 23: Detalle de Armónicos de Voltaje

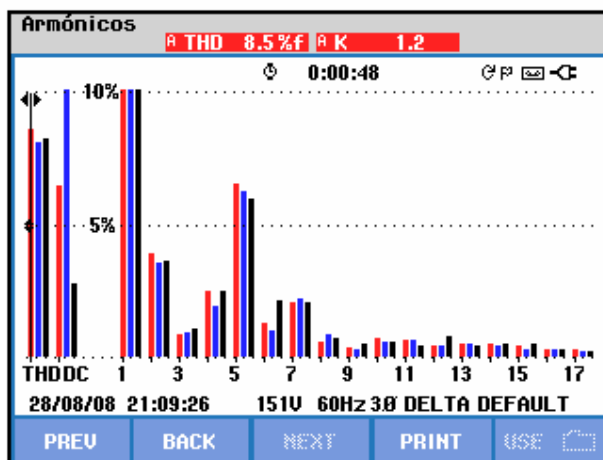


Figura 24: Gráfico de Armónicos de Corriente

TABLA ARMÓNICOS			
Amp	A	B	C
THD%f	8.4	7.9	8.2
H3%f	0.9	1.0	1.1
H5%f	6.5	6.1	5.9
H7%f	2.0	2.2	2.0
H9%f	0.3	0.3	0.5
H11%f	0.6	0.6	0.4
H13%f	0.5	0.5	0.4
H15%f	0.4	0.3	0.5

28/08/08 21:04:59 151V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT

PREV BACK NEXT PRINT USE

Figura 25: Detalle de Armónicos de Corriente

$$\%THD_{VOLTAGE} = 3.7$$

$$\%THD_{CORRIENTE} = 8.2$$

De acuerdo a estos resultados se puede calcular la eficiencia del convertidor en base a la relación de Potencia de Entrada y Salida.

$$V_{DC} = 107.3[V]$$

$$I_{DC} = 1.73[A]$$

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC}$$

$$P_{DC} = 185.63[W] \rightarrow \text{Potencia de Entrada}$$

$$P_{AC} = 210[W] \rightarrow \text{Potencia de Salida}$$

$$h = \frac{P_{SALIDA}}{P_{ENTRADA}} * 100\%$$

$$h = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} * 100\%$$

$$\boxed{h = 88.39\%}$$

CONCLUSIONES

Luego del diseño e implementación del UPS se puede concluir lo siguiente:

- La adecuada selección del UPS está sujeta a los problemas de calidad de energía que se requieran resolver y al tipo de carga a proteger (Crítica). De esta selección depende la complejidad del diseño.
- El tipo de control a escoger, Analógico o Digital, debe permitir un procesamiento de señales de forma versátil, siendo este último el más indicado.
- La utilización del DSP TMS320C2812 de la Texas Instrument fue acertada por contar con un bloque de salidas PWM que faciliten el control del convertidor. Sin embargo, la adquisición de datos análogos se dificultó, por necesitar señales libres de distorsión para su correcto procesamiento.
- Otro de los aciertos de la elección del DSP TMS320C2812 fue la compatibilidad que éste tiene con el MATLAB/SIMULINK, lo cual simplificó la programación.
- El módulo de IGBT IRAMY20UP60B por su diseño, está orientado a trabajar en MODO INVERSOR ya que su funcionalidad se enfoca al control de Motores.
- Para evitar los problemas causados por ruidos (Interferencias Electromagnéticas), fue necesario: Aislar los circuitos de Fuerza y

Control, Utilizar fuentes independientes que incluyan por diseño un Filtro LC, Implementar un Chasis Metálico que contenga a los inductores y Capacitores y realizar una adecuada conexión de puesta a Tierra.

- La norma IEEE 519-1992, establece que los límites máximos permitidos de Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente, son $THD_{V_{MAX}} = 5\%$ y $THD_{I_{MAX}} = 30\%$, por lo que, por los valores obtenidos, el UPS implementado cumple con la Norma.

RECOMENDACIONES

- No utilizar tiempos de muestreo menores a $20ms$ para evitar la recarga del DSP en el procesamiento y adquisición de señales.
- Tomar las medidas necesarias para que las señales que ingresen al DSP no superen los 3V, y que sean lo más puras posibles.
- Realizar correctamente las conexiones del modulo de IGBT y revisarlas previo al encendido
- Las señales PWM que controlan al IGBT deben tener el nivel de voltaje necesario para su encendido y apagado.
- Para evitar anomalías en la operación de los circuitos el orden de encendido de los mismos debe ser: DSP, Interfaz de Programación, Acondicionamiento de señales y circuito de Fuerza (Primero parte AC y luego DC). Para su apagado se debe realizar la secuencia inversa.
- Se debe realizar una buena conexión de puesta a tierra para evitar ruido en la red.

PROYECTO FUTURO

- Implementación y diseño de un controlador que permita realizar la transición entre las etapas de operación del UPS.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rashid Muhammad H., “ELECTRÓNICA DE POTENCIA”, 3^a Edición, Pearson Education, México 2004.
- [2] Rashid Muhammad H., “MANUAL DE ELECTRONICA DE POTENCIA”, Pensacola Florida, Academic Press, 2001.
- [3] Holmes G., Lipo T. A., “MODULACION POR ANCHO DE PULSOS PARA CONVERTIDORES DE POTENCIA – PRINCIPIOS Y PRACTICAS”, IEEE Press, Wiley – Interscience, 2003.
- [4] Texas Instruments, GUIA DE SELECCIÓN DE PROCESADORES DIGITALES DE SEÑALES, 2Q 2008.
- [20] Micrometals, “NUCLEOS DE MATERIAL FERROSO PARA CONVERSION DE POTENCIA Y APLICACIONES DE FILTRO DE LINEA”, ARTICULO L, Febrero 2007.
- [21] The Mathworks, Inc. SIMULINK USER´S GUIDE, 1997

Páginas de Internet

- [5] <http://www.cenam.mx/dme/pdf/PRE-Perspectiva%20de%20calidad%20de%20la%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica%20y%20su%20importancia%20en%20M%C3%A9xico.pdf>

- [6] <http://iteso.mx/~daniel/energia/energia.html>
- [7] <http://www.suomitec.com/Suomitec/armonicos.htm>
- [8] http://www.ininin.com.mx/cal_ruido.htm
- [9] <http://www.fuzzycontrolsac.com/articulos/articulo1.htm>
- [10] [http://prof.usb.ve/robert/Archivos_Compartidos/Material%20Tecnico/Material%20CSE/Trabajo%20Flicker%20\(Jose%20Leon\)%20%20\(CSE-USB-RAB%202005\).pdf](http://prof.usb.ve/robert/Archivos_Compartidos/Material%20Tecnico/Material%20CSE/Trabajo%20Flicker%20(Jose%20Leon)%20%20(CSE-USB-RAB%202005).pdf)
- [11] <http://www.sandc.com/products/purewave/dstatcom.asp>
- [12] http://209.85.165.104/search?q=cache:oS2yWS4_GrcJ:www.mgeups.com/techinfo/techpap/articles/0248-e.pdf+%22ups+first+appeared%22+-united&hl=es&ct=clnk&cd=2&gl=ec
- [13] <http://www.artel.com.ar/newsletter/0704/download/APC.PDF>
- [14] http://www.fasor.com.sv/nota_tecnica_4.pdf
- [15] <http://www.buchmann.ca/Article7-Page1.asp>
- [16] http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PI_D.pdf
- [17] http://www.kxcad.net/cae_MATLAB/toolbox/tic2000/inverseparktransformation.html
- [18] http://www.kxcad.net/cae_MATLAB/toolbox/tic2000/parktransformation.html

- [19]<http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaII/II/Aplicada/Cap02RedesPLL.pdf>
- [22]<http://www.monografias.com/trabajos17/procesamiento-digital/procesamiento-digital.shtml#SISTDIG>
- [23] <http://www.elo.utfsm.cl/~elo385/Documentos/Intro-DSP.pdf>

ANEXOS

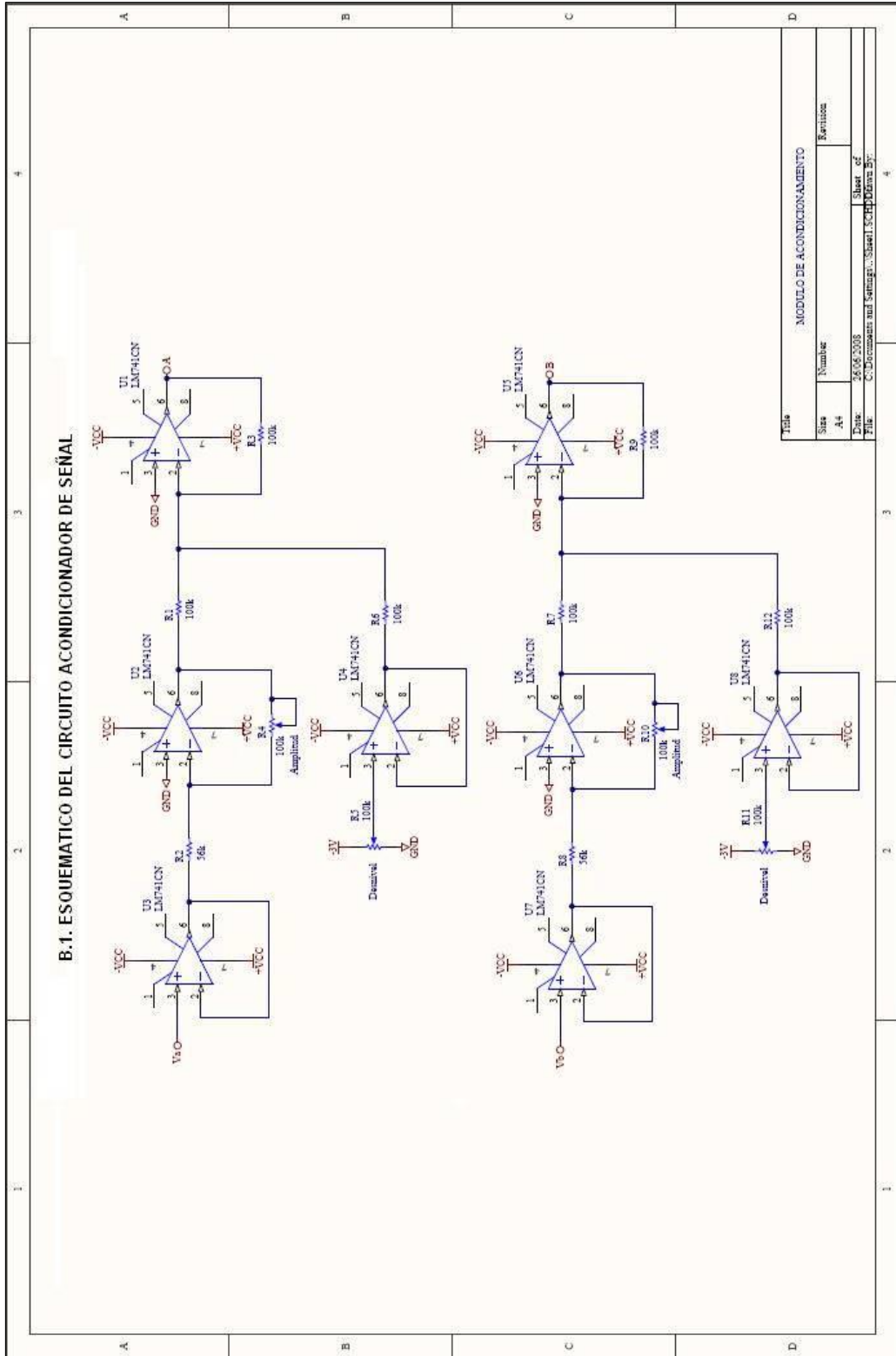
ANEXO A:

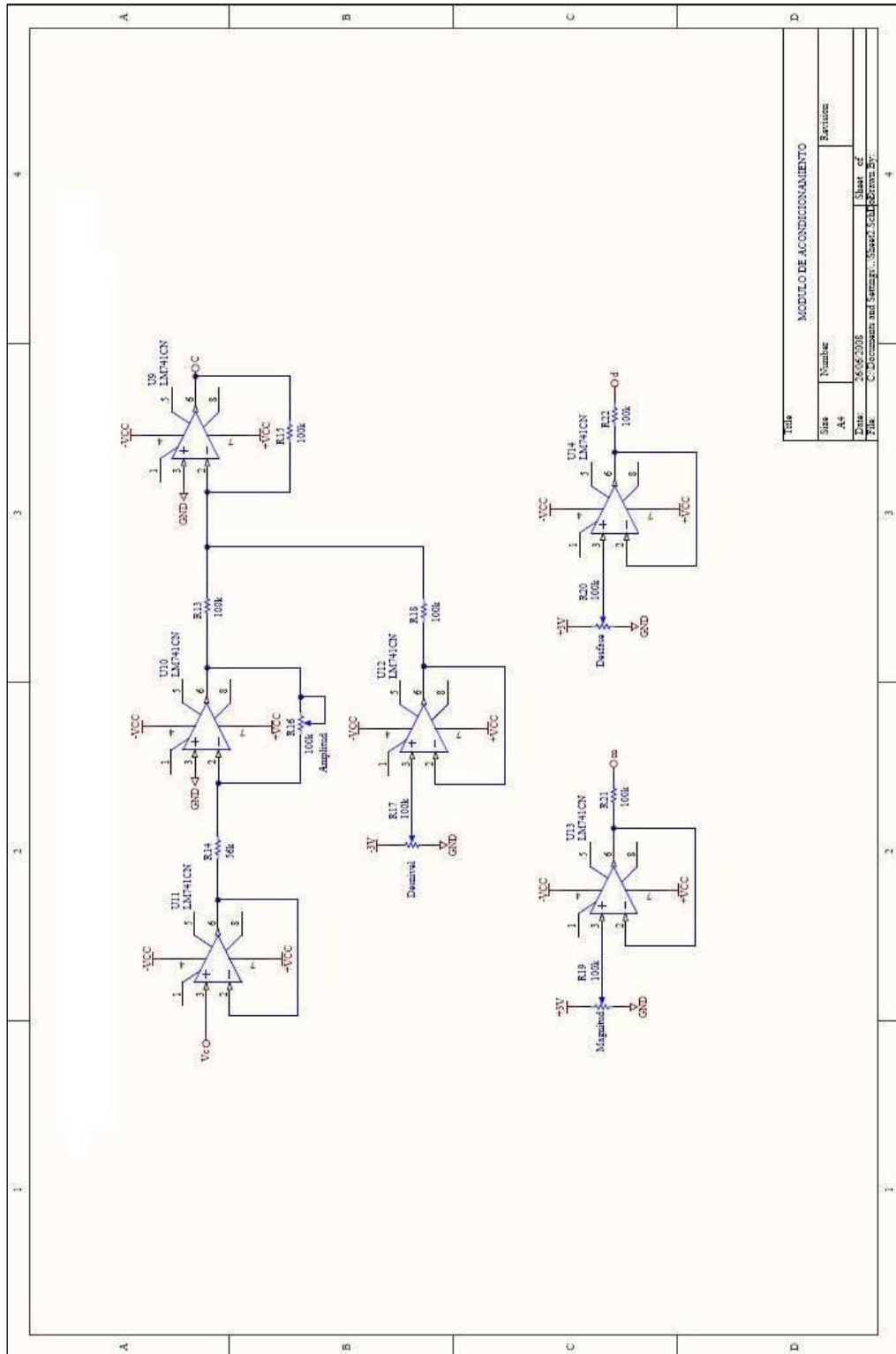
PLAN DE ACTIVIDADES

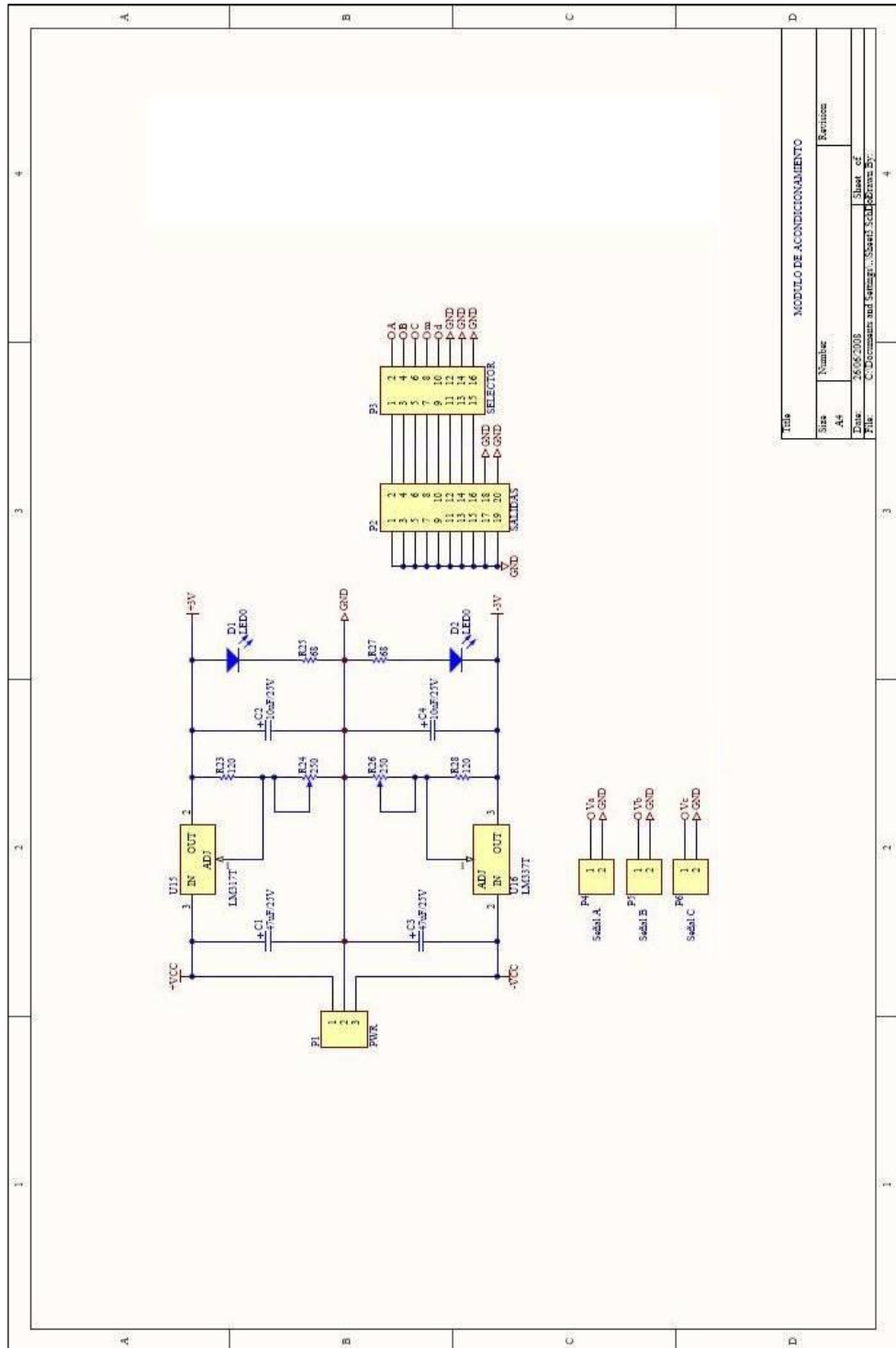
NUM.	SEMANA	MES	ACTIVIDAD	AVANCE
1	DEL 24 AL 30	DIC 2007	- Elaboración del diseño de los circuitos de interfaz Control-Fuerza	- Se simula los circuitos de medición de voltaje AC del sistema
2	DEL 31 AL 6	ENE 2008	- Cotización de elementos y compra de componentes	
3	DEL 7 AL 13	ENE 2008	- Fabricación de Circuitos Impresos - Cotización y compra de elementos para banco de pruebas	
4	DEL 14 AL 20	ENE 2008	- Ensamble de circuitos impresos	
5	DEL 21 AL 27	ENE 2008	- Ensamble de banco de pruebas para convertidor	
6	DEL 28 AL 3	FEB 2008	- Escritura y documentación teórica de la tesis - Prueba de los Circuitos Impresos	- Las pruebas fueron realizadas utilizando el DSP para generar una señal PWM, y se usaron los bloques de Simulink
7	DEL 4 AL 10	FEB 2008	- Calibración de la etapa de adquisición de Señales del Convertidor	- Se realizaron cambios en algunos elementos del diseño original para ajustar la adquisición de señales con armónicos
8	DEL 11 AL 17	FEB 2008	- Pruebas del convertidor Trifásico operando como INVERSOR - Simulación de Bloques del TARGET FOR TI C2000	- Para la operación como INVERSOR se usaron únicamente bloques básicos de Simulink
9	DEL 18 AL 24	FEB 2008	- Diseño de simulaciones, usando Herramienta TARGET FOR TI C2000	- Utilización de los Bloques de Operaciones Matemáticas, y las herramientas de Transformadas
10	DEL 25 AL 2	MAR 2008	- Implementación de la Simulación en el Convertidor Trifásico operando como INVERSOR	- Se controló la magnitud y el desfase usando el bloque de Transformada de Park
11	DEL 3 AL 9	MAR 2008	- Pruebas de la adquisición de datos - Prueba del comportamiento de la señal ingresada al DSP	- Se define proceso de calibración de la adquisición de señales - Se observa pérdidas de la integridad en las señales
12	DEL 10 AL 16	MAR 2008	- Diseño de Filtro para atenuación de ruido - Simulación de Convertidor operando como RECTIFICADOR	- Se observa persistencia de ruido leve en las señales, aceptable
13	DEL 17 AL 23	MAR 2008	- Implementación de RECTIFICADOR - Estudio de causas de inestabilidad del sistema	- Se observan problemas en control de fase, falta de estabilidad
14	DEL 24 AL 30	MAR 2008	- Implementación de soluciones para mejorar estabilidad del sistema	- Se resuelve implementar desfase en marco referencial estacionario de dos ejes, tomando referencia de alimentación de la red
15	DEL 31 AL 6	ABR 2008	- Pruebas de convertidor operando como INVERSOR	- Operación como INVERSOR sin problemas
16	DEL 7 AL 13	ABR 2008	- Pruebas de convertidor operando como RECTIFICADOR	- Operación como RECTIFICADOR con problemas por ruido en la señal de la adquisición
17	DEL 14 AL 20	ABR 2008	- Diseño de un nuevo circuito para adquisición de señales trifásicas - Simulación del nuevo sistema	
18	DEL 21 AL 27	ABR 2008	- Implementación del nuevo sistema de adquisición de señales. - Montaje de Chasis cerrado de los elementos del filtro de segundo orden.	- Se atenuó la cantidad de Ruido en las señales, pero continúan los problemas con los desvíos de señales.
19	DEL 28 AL 4	MAY 2008	- Pruebas en el convertidor, variando programa del DSP. - Se implementa un ajuste externo de nivel de la señal	- De acuerdo a una calibración manual, se arreglaba no en su totalidad el desnivel que tiene las señales. - Se realizaron pruebas simulando el sistema con estos problemas presentes.

NUM.	SEMANA	MES	ACTIVIDAD	AVANCE
20	DEL 5 AL 11	MAY 2008	- Prueba de bloques TIC2000 simulando problemas de armónicos y desruel en señales adquiridas	- Se observa la necesidad de corregir bloque de transformación de Clarke - Se implementa bloque de transformación de Clarke mejorado "
21	DEL 12 AL 18	MAY 2008	- Pruebas del convertidor, usando el nuevo bloque de transformada de Clarke	- Desapareció el desruel de las señales y esta libre de ruido. - Se implementaron ajuste de magnitud y desfase para realizar pruebas operando como RECTIFICADOR - Se obtuvieron muy buenos resultados.
22	DEL 19 AL 25	MAY 2008	- Pruebas del convertidor operando como INVERSOR y RECTIFICADOR	
23	DEL 26 AL 1	JUN 2008	- Se realizó la calibración de las señales operando como INVERSOR y RECTIFICADOR.	- Se concluyo con las pruebas de los sistemas
24	DEL 2 AL 8	JUN 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	
25	DEL 9 AL 15	JUN 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	
26	DEL 15 AL 22	JUN 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	
27	DEL 23 AL 29	JUN 2008	- Soldar Placas y probar sistema	- Se concluyo con la pruebas de los sistemas con las placas
28	DEL 30 AL 6	JUL 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	
29	DEL 7 AL 13	JUL 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	
30	DEL 14 AL 20	JUL 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	
31	DEL 21 AL 27	JUL 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	
32	DEL 28 AL 3	JUL 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	
33	DEL 4 AL 10	AGO 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	- Revisión de Documentación con Director de Tesis
34	DEL 11 AL 17	AGO 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	- Revisión de Documentación con Director de Tesis
35	DEL 18 AL 24	AGO 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	- Revisión de Documentación con Director de Tesis
36	DEL 25 AL 31	AGO 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	- Revisión de Documentación con Director de Tesis
37	DEL 1 AL 7	SEP 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	- Revisión de Documentación con Director de Tesis
38	DEL 8 AL 14	SEP 2008	- Elaboración y documentación de la Tesis	- Finalización de Documentación de Tesis

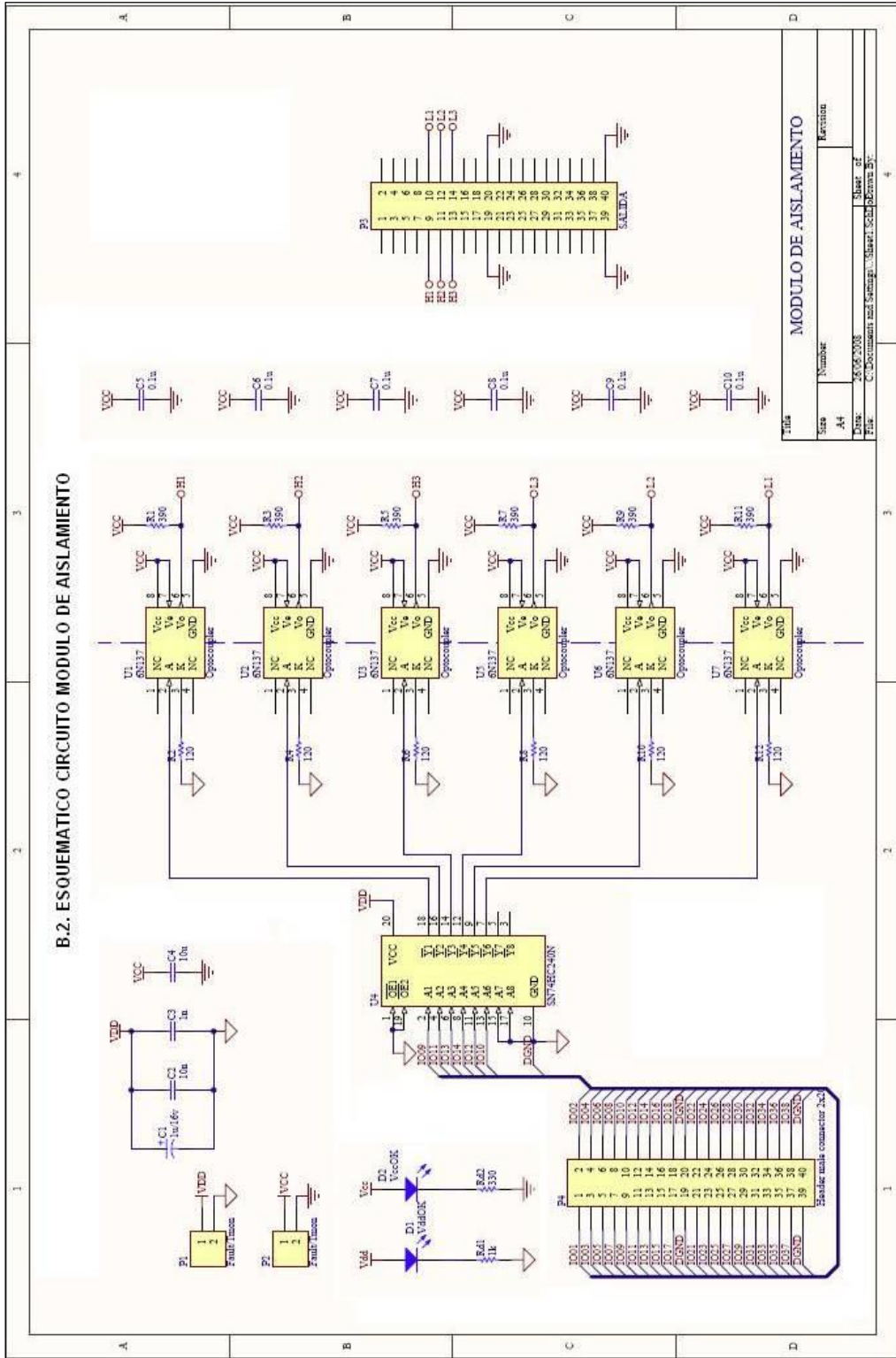
ANEXO B:
ESQUEMÁTICOS





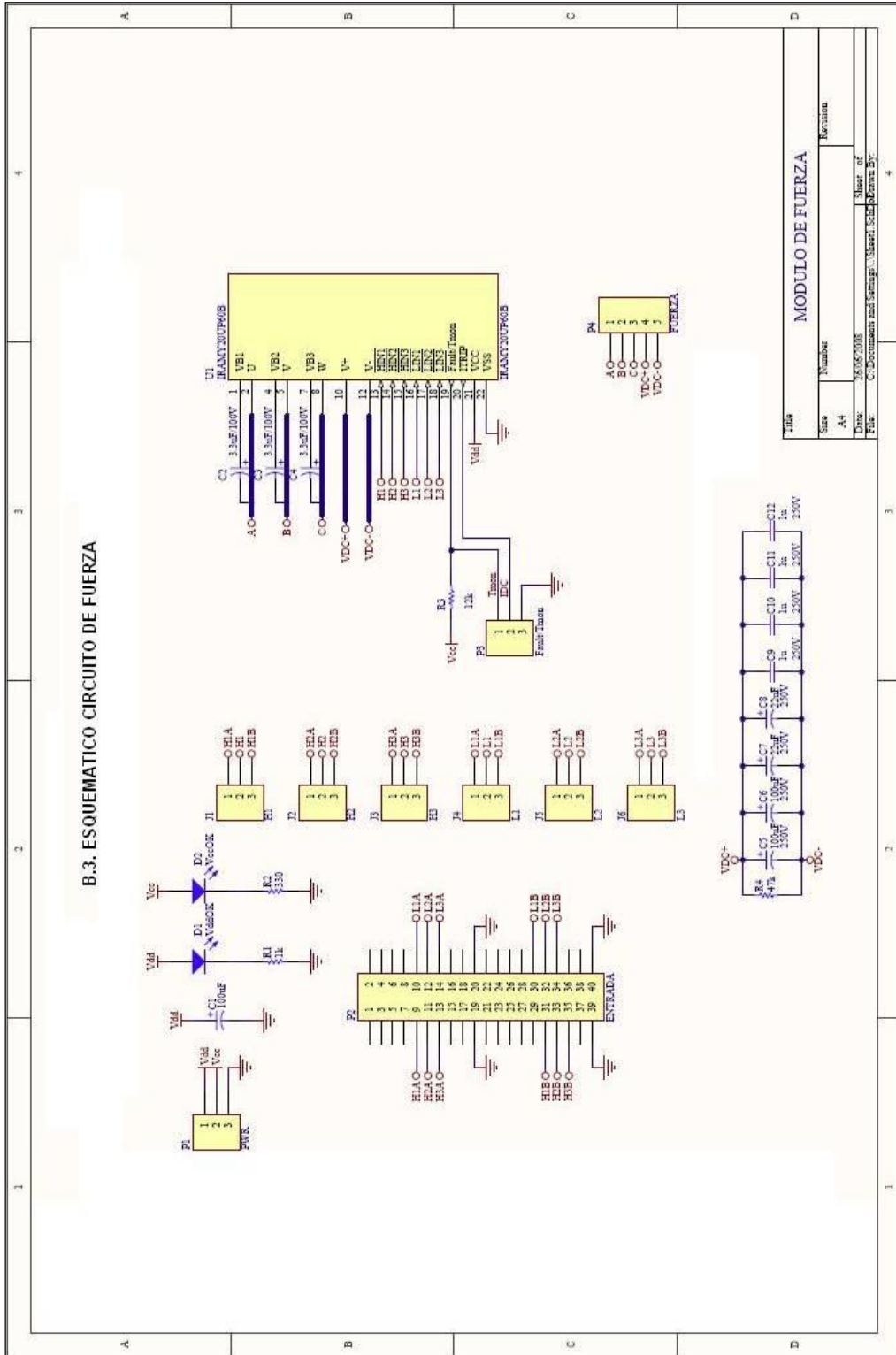


Título			
Módulo de Acondicionamiento			
Size	Number	Revision	
A4			
Date	26/02/2008	Sheet of	
File	C:\Compras\mod\Samap\...Modulo de Acondicionamiento	Sheet of	

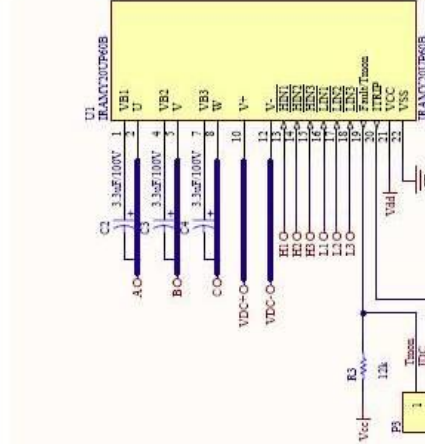
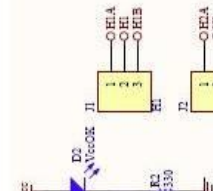
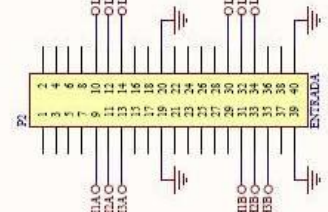
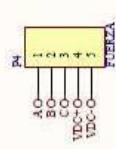
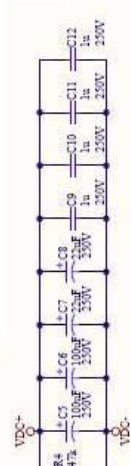


Title		MODULO DE AISLAMIENTO	
Size	Number	Revision	
A4			
Date:	26.05.2008	Sheet of	4
File:	C:\Documents and Settings\... \Sheet1.Sch	Drawn by:	

B.3. ESQUEMATICO CIRCUITO DE FUERZA



Size	Number	Revision
A4		
Issue	01/05/2008	Sheet 02
File	C:\Documents and Settings\... \Sheet1.Sch	Format 91:



ANEXO C:

HOJA DE ESPECIFICACIONES

MODULO DE IGBT IRAMY20UP60B

<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/iramy20up60b.pdf>

MANUAL DE OPERACIÓN DSP TMS320F2812

<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f2812.pdf>

HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL DSP TMS320F2812

http://c2000.spectrumdigital.com/ezf2812/docs/ezf2812_techref.pdf

MANUAL TÉCNICO DE BATERIAS BP7-12

<http://www.bb-battery.com/bp7-12.pdf>

REGULADORES DE VOLTAJE

<http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM317.pdf>

<http://www.fairchildsemi.com/ds/LM%2FLM337.pdf>

AMPLIFICADORES OPERACIONALES

<http://www.cytron.com.my/datasheet/IC/linear/LM741CH.pdf>

OPTOACOPLADORES 6N137

<http://dianxin.nchu.jx.cn/web/component/data/optocoupler/6N137.pdf?ctype=6N1>

[37](#)

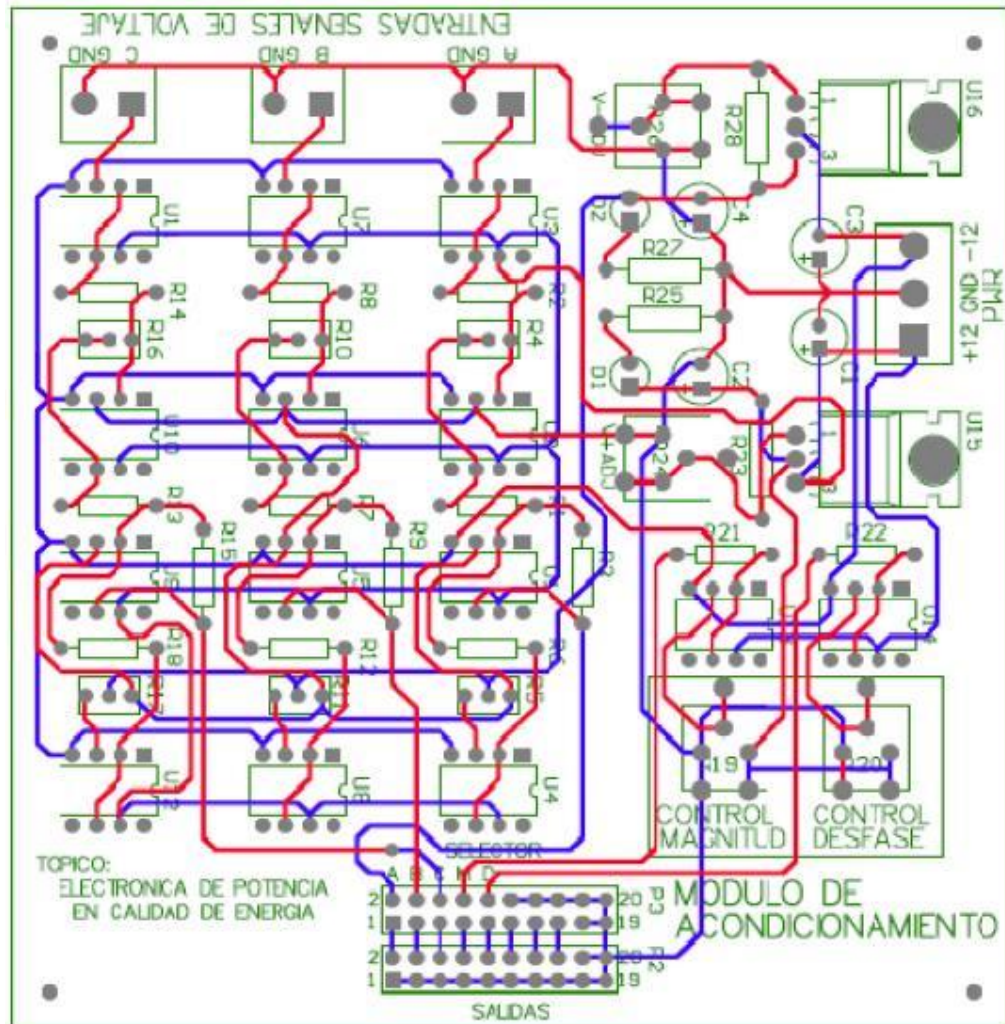
BUFFER 74HC240

<http://www.robotstore.com/download/45612.pdf>

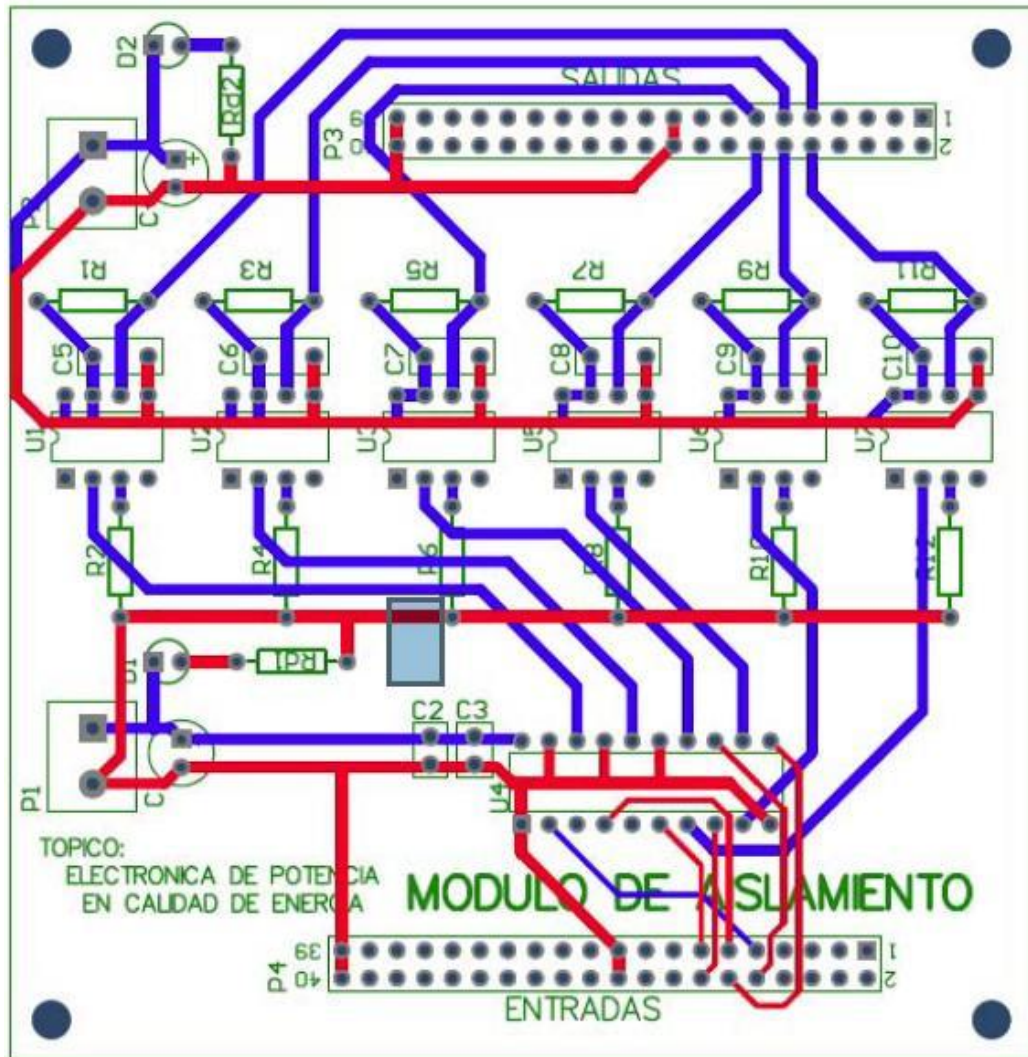
ANEXO D:

IMPRESO DE TARJETAS

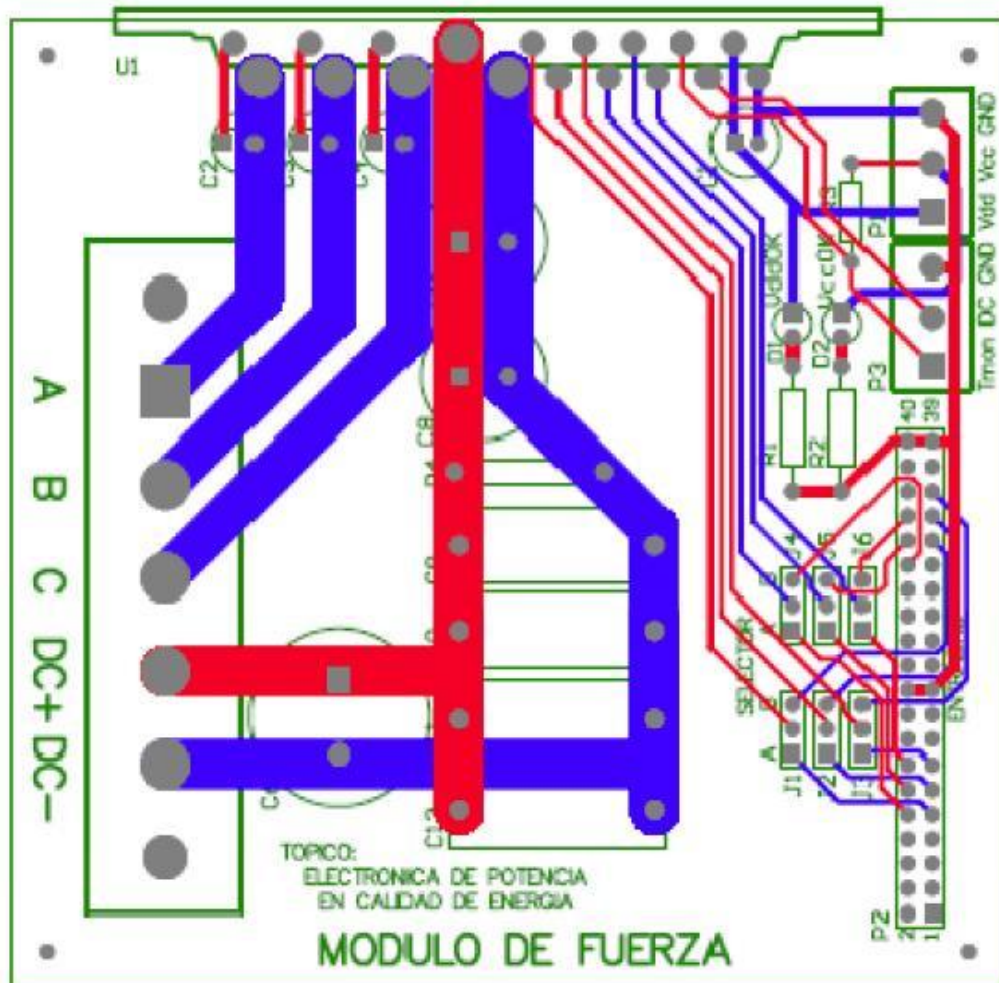
D.1. TARJETA DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL



D.2. TARJETA DEL CIRCUITO DE AISLAMIENTO



D.3. TARJETA DEL CIRCUITO DE FUERZA



ANEXO E:

ANALISIS DE COSTOS

E.1. MODULO DE ACONDICIONAMIENTO				
No.	Elemento	Cant.	Costo/Unit.	Costo Total
1	Bornera PCB bloque de dos terminales	3	\$ 0,40	\$ 1,20
2	Capacitor electrolítico 10uF - 25V	2	\$ 0,05	\$ 0,10
3	Capacitor electrolítico 47uF - 25V	2	\$ 0,05	\$ 0,10
4	Circuito Impreso	1	\$ 24,56	\$ 24,56
5	Conector hembra 2 x 10 pines	1	\$ 3,00	\$ 3,00
6	Conector macho 2 x 10 pines	1	\$ 1,20	\$ 1,20
7	Led de 3mm	2	\$ 0,10	\$ 0,20
8	LM317T (Regulador de voltaje positivo)	1	\$ 0,90	\$ 0,90
9	LM337T (Regulador de voltaje negativo)	1	\$ 1,00	\$ 1,00
10	LM741CN (Amplificador Operacional)	14	\$ 0,45	\$ 6,30
11	Potenciómetro de ajuste 100K	2	\$ 0,20	\$ 0,40
12	Potenciómetro de ajuste 100K - 12 vueltas	6	\$ 1,81	\$ 10,86
13	Potenciómetro de ajuste 250	2	\$ 0,20	\$ 0,40
14	Resistencia 100K 1/4 W	11	\$ 0,05	\$ 0,55
15	Resistencia 120 -1/2W	2	\$ 0,05	\$ 0,10
16	Resistencia 56K 1/4 W	3	\$ 0,05	\$ 0,15
17	Resistencia 68-1/2W	2	\$ 0,05	\$ 0,10
18	Socket DIP 8	14	\$ 0,15	\$ 2,10
SUBTOTAL 1				\$ 53,22

E.2. MODULO DE AISLAMIENTO				
No.	Elemento	Cant.	Costo/Unit.	Costo Total
19	Bornera PCB bloque de dos terminales	2	\$ 0,40	\$ 0,80
20	Capacitor cerámico 0.1 uF/50V	6	\$ 0,10	\$ 0,60
21	Capacitor cerámico 1 nF/50V	1	\$ 0,10	\$ 0,10
22	Capacitor cerámico 10 nF/50V	1	\$ 0,10	\$ 0,10
23	Capacitor electrolítico 10 uF	1	\$ 0,05	\$ 0,05
24	Capacitor electrolítico 1uF - 16V	1	\$ 0,05	\$ 0,05
25	Circuito Impreso	1	\$ 24,56	\$ 24,56
26	Conector macho 2 x 20 pines	2	\$ 6,48	\$ 12,96
27	Led 3mm	2	\$ 0,10	\$ 0,20
28	Optoacoplador 6N137	6	\$ 3,50	\$ 21,00
29	Resistencia 1K -1/4W	1	\$ 0,05	\$ 0,05
30	Resistencia 120 - 1/4 W	6	\$ 0,05	\$ 0,30
31	Resistencia 330 - 1/4 W	1	\$ 0,05	\$ 0,05
32	Resistencia 390 - 1/4 W	6	\$ 0,05	\$ 0,30
33	SN74HC24ON Buffer octal	1	\$ 0,54	\$ 0,54
34	Socket DIP 20	1	\$ 0,65	\$ 0,65
35	Socket DIP 8	6	\$ 0,15	\$ 0,90
SUBTOTAL 2				\$ 63,21

E.3. MODULO DE FUERZA				
No.	Elemento	Cant.	Costo/Unit.	Costo Total
36	Bornera PCB bloque de 3 terminales	2	\$ 0,50	\$ 1,00
37	Bornera PCB de fuerza 5 terminales	1	\$ 4,53	\$ 4,53
38	Capacitor cerámico 1uF - 250V	4	\$ 1,00	\$ 4,00
39	Capacitor electrolítico 100 uF - 250V	1	\$ 0,70	\$ 0,70
40	Capacitor electrolítico 100 uF - 25V	1	\$ 0,05	\$ 0,05
41	Capacitor electrolítico 22 uF - 250V	2	\$ 0,25	\$ 0,50
42	Capacitor electrolítico 3.3 uF - 100V	3	\$ 0,05	\$ 0,15
43	Circuito Impreso	1	\$ 24,56	\$ 24,56
44	Conector macho 1x3 pines	6	\$ 1,20	\$ 7,20
45	Conector macho 2 x 20 pines	1	\$ 6,48	\$ 6,48
46	IRAMY20UP60B Módulo IGBT trifásico	1	\$ 53,50	\$ 53,50
47	Led 3mm	2	\$ 0,10	\$ 0,20
48	Resistencia 12K - 1/4 W	1	\$ 0,05	\$ 0,05
49	Resistencia 1K - 1/4 W	1	\$ 0,05	\$ 0,05
50	Resistencia 330- 1/4 W	1	\$ 0,05	\$ 0,05
51	Resistencia 47K - 1 W	1	\$ 0,05	\$ 0,05
			SUBTOTAL 3	\$ 103,07

E.4. ELEMENTOS VARIOS				
No.	Elemento	Cant.	Costo/Unit.	Costo Total
52	Alambre esmaltado #14 (m)	25	\$ 0,40	\$ 10,00
53	Bateria 12 V - 7Ah	8	\$ 27,00	\$ 216,00
54	Bornera de 12 terminales	3	\$ 1,50	\$ 4,50
55	Bornera para plug banana	30	\$ 0,28	\$ 8,40
56	Breaker 1P-10A	1	\$ 20,00	\$ 20,00
57	Breaker 3P-10A	1	\$ 20,00	\$ 20,00
58	Cable #12 (m)	3	\$ 0,52	\$ 1,57
59	Cable #16 (m)	5	\$ 0,27	\$ 1,35
60	Cable #22 (m)	20	\$ 0,25	\$ 5,00
61	Caja metálica para filtro LC	1	\$ 10,00	\$ 10,00
62	Caja metálica para todo el proyecto	1	\$ 45,60	\$ 45,60
63	Capacitor AC 130uF - 250V	3	\$ 2,50	\$ 7,50
64	Computadora Pentium 4 - 512MB RAM	1	\$ 500,00	\$ 500,00
65	Disipador para módulo IGBT	1	\$ 5,23	\$ 5,23
66	Fuente ATX de 500 W	2	\$ 35,00	\$ 70,00
67	Fusibles 10x38 6A	4	\$ 1,00	\$ 4,00
68	kit eZdsp TMS320F2812	1	\$ 489,00	\$ 489,00
69	Núcleo toroide T520-40 MICROMETALS	3	\$ 6,00	\$ 18,00
70	Portafusibles 10x38	4		\$ 0,00
71	Terminales de ojo	30	\$ 0,20	\$ 6,00
72	Transformadores 110 - 6V 500mA	3	\$ 2,80	\$ 8,40
			SUBTOTAL 4	\$ 1.450,56

TOTAL			\$ 1.670,06
--------------	--	--	--------------------