



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

DISEÑO, MODELADO Y CONSTRUCCIÓN A ESCALA DE UN TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUCIÓN HÍBRIDO PARA MEJORAR ÍNDICES DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. MAIDIER DÍAZ OJEDA

TUTOR PRINCIPAL

DR. JUAN RAMÓN RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, OCTUBRE, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. César Angeles Camacho
Secretario: Dr. Mario Roberto Arrieta Paternina
1er. Vocal: Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez
2do Vocal: Dr. Luis Miguel Castro González
3er. Vocal: Dr. Jesús Ávila Montes

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez

FIRMA

PENSAMIENTO

“Nunca consideres el estudio como un deber, sino como una oportunidad para penetrar en el maravilloso mundo del saber”

Albert Einstein

DEDICATORIA

Dedico esta victoria a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo.

- *En especial a mis padres: Por ser mi guía durante toda una vida, especialmente en este tiempo, con todo el cariño y amor para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, entregándome en cada momento amor, ternura, seguridad y confianza.*
- *A mi tío Vidal: Por estar siempre ahí, brindándome su apoyo incondicional y compartir conmigo buenos y malos momentos, cada vez que lo he necesitado.*
- *A toda mi familia en general.*
- *A todas esas personas y a todos los que me han apoyado y ayudado durante estos dos años, les dedico este triunfo.*

AGRADECIMIENTOS

- *A mi tutor Juan Ramón Rodríguez Rodríguez, por su dedicación, interés y apoyo incondicional durante la realización de este trabajo.*
- *A mis padres, por ser mi guía a lo largo de mi vida y por confiar en mí.*
- *Agradezco encarecidamente a mis familiares y amigos por su constante preocupación.*
- *A mis amigos Fernando, Yoendric y Yosman por estar ahí en cada momento, durante todo este tiempo.*
- *A mis compañeros tesisistas Alfredo Velázquez, Jesús Hernández, Cristóbal Ramírez y Gabriel Osorio, por su compañía en el laboratorio y por sus valiosos consejos.*
- *A mis compañeros de estudio, por compartir los momentos buenos y difíciles durante nuestra trayectoria estudiantil.*
- *Al personal del laboratorio de máquinas de la Facultad de Ingeniería.*
- *A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por haberme dado la oportunidad de continuar con mi formación académica profesional.*
- *Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por proporcionarme los recursos económicos durante este posgrado, sin los cuales no hubiese sido posible la realización de este proyecto.*
- *A todas las personas que de una forma u otra han colaborado para el desarrollo de este trabajo.*

A todos muchas gracias

RESUMEN

La conexión de cargas no lineales ha provocado un aumento de la presencia de corrientes armónicas en las redes eléctricas de distribución. Esto, unido al comportamiento estocástico en el desbalance de potencia trifásica, tiende a generar problemáticas de calidad de la energía. La sumatoria de dichos fenómenos, genera efectos negativos en redes eléctricas e instalaciones industriales, destacándose, la saturación de líneas, cables y transformadores; envejecimiento prematuro de los equipos, circulación de corrientes por los neutros, bajo factor de potencia y desbalances de voltajes trifásicos en la red. Dichos efectos, finalmente, derivan en pérdidas económicas por daños provocados en los equipos industriales y residenciales, así como baja calidad de la energía distribuida. Todo ello, impacta negativamente en la eficiencia del sistema y, por lo tanto, en un mayor costo en la operación.

Esta tesis propone una solución innovadora definida como Transformador de Distribución Híbrido (TDH), que consiste en la integración de un transformador de distribución convencional con electrónica de potencia, mediante el uso de convertidores del tipo puente H interconectados usando el método de fases cruzadas. El TDH tiene como objetivo, lograr atributos de funcionalidad que impacten de manera positiva en la calidad de energía, confiabilidad y eficiencia del sistema de distribución de energía.

Este diseño va de la mano con las necesidades imperantes en las redes eléctricas futuras, pues resulta ser más eficaz y flexible que los transformadores convencionales de distribución por sus ventajas operativas como, por ejemplo: *i*) generación de potencia reactiva sin uso de partes móviles; *ii*) regulación continua de voltaje en el devanado secundario; *iii*) filtrado de armónicos y *iv*) balance de potencia en el primario.

Por otro lado, el TDH demuestra ser más confiable respecto a las propuestas de transformadores electrónicos, debido a que este puede comportarse como un transformador convencional de 60Hz ante un fallo en alguna de las etapas de electrónica de potencia, logrando así que el suministro eléctrico sea ininterrumpido.

La validación de esta propuesta innovadora ha sido modelada analíticamente, implementada en simulación y validada a través de un prototipo a escala en laboratorio, evaluando diferentes casos de estudio de forma experimental. Finalmente, se logran demostrar las ventajas operativas del TDH con respecto a otras estructuras topológicas analizadas en la literatura científica.

ABSTRACT

The connection of non-linear loads has caused an increase in the presence of harmonic currents in electrical distribution networks. This, together with the stochastic behavior in the three-phase power imbalance, tends to generate power quality problems. The sum of these phenomena, generates negative effects in electrical networks and industrial facilities, highlighting the saturation of conductors and transformers; premature aging of the equipment, circulation of currents through the neutrals, low power factor and imbalances of three-phase voltages in the network. These effects, finally, result in economic losses due to damage caused to industrial and residential equipment, as well as poor quality of distributed energy. All this negatively impacts the efficiency of the system and, therefore, a greater cost in the operation.

This thesis proposes an innovative solution defined as a Hybrid Distribution Transformer (TDH), which consists of the integration of a conventional distribution transformer with power electronics, through the use of interconnected H-bridge converters using the cross-phase method. The TDH aims to achieve functionality attributes that positively impact the energy quality, reliability and efficiency of energy distribution system. This design goes hand in hand with the prevailing needs in future power networks, as it turns out to be more efficient and flexible than conventional distribution transformers due to their operational advantages, such as: i) generation of reactive power without the use of moving parts, ii) continuous voltage regulation in the secondary winding iii) harmonic filtration and iv) power balance in the primary.

On the other hand, the TDH proves to be more reliable with respect to the proposals of electronic transformers, because this can behave like a conventional 60Hz transformer in the event of a failure in any of the power electronics stages, thus achieving that the electricity supply is uninterrupted.

The validation of this innovative proposal has been analytically modeled, implemented in simulation and validated through a prototype on a laboratory scale, evaluating different case studies experimentally. Finally, it is possible to demonstrate the operational advantages of TDH with respect to other topological structures analyzed in the scientific literature.

ÍNDICE

PENSAMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ACRÓNIMOS	XIV
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Hipótesis	4
1.4. Propuesta de investigación	4
1.5. Objetivo general	6
1.5.1. Objetivos específicos	6
1.6. Justificación	6
1.7. Metodología	8
1.8. Organización de la tesis	9
CAPÍTULO II: ELECTRÓNICA DE POTENCIA EN REDES ELÉCTRICAS	10
2.1. Introducción.....	10
2.2. Calidad de la energía.....	11
2.2.1. Factores que afectan la calidad de la energía	11
2.2.1.1 Interrupciones momentáneas y de larga duración.....	11
2.2.1.2 Ruido	12
2.2.1.3 Distorsión armónica	12
2.2.1.4 Impulsos	12
2.2.1.5 Bajo voltaje	12
2.2.1.6 Depresión de voltaje (Sag)	13
2.2.1.7 Elevación súbita del voltaje (Swell)	13
2.2.2. Antecedentes de solución	13
2.2.2.1 Transformador con cambiador de taps.....	14

2.2.2.2 Bancos de capacitores	14
2.2.2.3 Filtros	14
2.2.3. Dispositivos custom power.....	15
2.2.3.1 Restaurador dinámico de voltaje	16
2.2.3.2 Sistema de compensadores estáticos síncronos de distribución	16
2.2.3.3 Acondicionador de calidad de energía unificado.....	16
2.3. Estado del arte del transformador electrónico o de estado sólido	17
2.4. Transformador Híbrido.....	19
2.5. Análisis crítico del estado de la técnica	22
CAPÍTULO III: PROPUESTA Y MODELADO DE LAS DIFERENTES TOPOLOGÍAS ...	24
3.1. Introducción.....	24
3.2. Modelo de transformador convencional.....	24
3.2.1. Transformador ideal	24
3.2.1.1 Modelo del transformador ideal	24
3.2.2. Transformador real.....	25
3.2.2.1 Modelo del transformador.....	25
3.3. Convertidor puente tipo H	26
3.3.1. Modelo del convertidor puente H	26
3.3.2. Modelo matemático en el dominio del tiempo del convertidor puente H.....	28
3.3.3. Principio de funcionamiento	29
3.3.4. Modelo del puente H en el dominio de la frecuencia.....	31
3.4. Control de voltaje de CD	31
3.5. Control de reactivos	33
3.6. Propuesta y modelado de la topología del TDH	33
3.6.1. Descripción de la Topología	33
3.6.2. Etapa de rectificación (conversión CA-CD).....	34
3.6.3. Etapa inversora (Convertidor CD-CA de alto voltaje)	35
3.7. Análisis cuantitativo del comportamiento de las potencias del TDH	38
CAPÍTULO IV: CASOS DE ESTUDIO	39
4.1. Introducción.....	39
4.2. Descripción del esquemático de simulación	39
4.3. Casos de estudio.....	42
4.3.1. Balance continuo de potencias en el primario	42
4.3.2. Corrección del factor de potencia	45
4.3.3. Regulación de tensión en las cargas.....	47
4.3.4. Inmunidad ante la pérdida de una fase	49
4.3.5. Inyección de reactivos a la red (Compensación de VARs)	52
4.3.6. Flujo de potencia bidireccional (Integración de Energías Renovables)	54
4.3.7. Múltiples escenarios	56

4.4. Conclusiones particulares.....	60
CAPÍTULO V: EXPERIMENTO	61
5.1. Introducción.....	61
5.2. Descripción y armado del prototipo	61
5.3. Generación de los pulsos de control.....	64
5.3.1. Entorno en Matlab/Simulink.....	64
5.4. Experimento.....	67
5.4.1. Etapa inversora	67
5.4.2. Etapa rectificadora. Casos de estudio.....	69
5.4.2.1 Escalón de carga	69
5.4.2.2 Depresión de voltaje	70
5.4.2.3 Corrección de factor de potencia	71
5.5. Discusión	71
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	72
6.1. Conclusiones	72
6.2. Trabajos futuros.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	75
APÉNDICES.....	81
Apéndice A: Hoja de datos del IGBT modelo G4PC50FD	81
Apéndice B: Optoacoplador TLP250	82
Apéndice C: Amplificador de aislamiento, usado para el sensor de voltaje del bus de CD .	83
Apéndice D: Fuentes de voltaje CD-CD de 5V	84

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

FIG. 1. 1.- TIPOS DE TRANSFORMADORES INTELIGENTES A) TRANSFORMADOR ELECTRÓNICO	B)
TRANSFORMADOR HÍBRIDO.....	2
FIG. 1. 2.- PROPUESTA TOPOLÓGICA DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN HÍBRIDO	5

CAPÍTULO II

FIG. 2. 1.- FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.	13
FIG. 2. 2.- PROPUESTA PARA MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA	14
FIG. 2. 3.- PRINCIPALES SISTEMAS CUSTOM POWER	16
FIG. 2. 4.- TRANSFORMADOR DE ESTADO SÓLIDO. CONCEPTO BÁSICO.	17
FIG. 2. 5.- CLASIFICACIÓN DE LAS TOPOLOGÍAS BÁSICAS DE LOS SST.....	18

CAPÍTULO III

FIG. 3. 1.- MODELO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR REAL.	26
FIG. 3. 2.- CONVERTIDOR CA/CD PUENTE H COMPLETO.....	27
FIG. 3. 3.- CIRCUITO EQUIVALENTE DEL RECTIFICADOR MONOFÁSICO PWM DE PUENTE H ACTIVO.....	29
FIG. 3. 4.- ESPACIO VECTORIAL V_{TK} PARA EL RECTIFICADOR MONOFÁSICO.....	30
FIG. 3. 5.- CONTROLADOR Y MODELO DE PLANTA PARA EL RECTIFICADOR PFC MONOFÁSICO.....	33
FIG. 3. 6.- TOPOLOGÍA DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN HÍBRIDO.	34

CAPÍTULO IV

FIG. 4. 1.- ESQUEMÁTICO DEL TDH EN MATLAB/SIMULINK.	40
FIG. 4. 2.- ESQUEMÁTICO DE SIMULACIÓN DE LOS CONVERTIDORES EN PLATAFORMA MATLAB/SIMULINK.	41
FIG. 4. 3.- VOLTAJES VS CORRIENTES POR FASE DE ENTRADA SALIDA PARA CASO 1.....	44
FIG. 4. 4.- POTENCIAS DE ENTRADA Y SALIDA EN CA Y POTENCIAS INTERNAS EN CD PARA CASO 1.	44
FIG. 4. 5.- VOLTAJES VS CORRIENTES POR FASE DE ENTRADA SALIDA PARA CASO 2.....	46
FIG. 4. 6.- POTENCIAS DE ENTRADA Y SALIDA EN CA Y POTENCIAS INTERNAS EN CD PARA CASO 2.	46
FIG. 4. 7.- VOLTAJES VS CORRIENTES POR FASE DE ENTRADA SALIDA PARA CASO 3.....	48
FIG. 4. 8.- POTENCIAS DE ENTRADA Y SALIDA EN CA Y POTENCIAS INTERNAS EN CD PARA CASO 3.	49
FIG. 4. 9.- VOLTAJES VS CORRIENTES POR FASE DE ENTRADA SALIDA PARA CASO 4.....	50
FIG. 4. 10.- POTENCIAS DE ENTRADA Y SALIDA EN CA Y POTENCIAS INTERNAS EN CD PARA CASO 4.	51
FIG. 4. 11.- VOLTAJES VS CORRIENTES POR FASE DE ENTRADA SALIDA PARA CASO 5.....	53
FIG. 4. 12.- POTENCIAS DE ENTRADA Y SALIDA EN CA Y POTENCIAS INTERNAS EN CD PARA CASO 5.	53
FIG. 4. 13.- VOLTAJES VS CORRIENTES POR FASE DE ENTRADA SALIDA PARA CASO 6.....	55
FIG. 4. 14.- POTENCIAS DE ENTRADA Y SALIDA EN CA Y POTENCIAS INTERNAS EN CD PARA CASO 6.	56
FIG. 4. 15.- VOLTAJES VS CORRIENTES POR FASE DE ENTRADA SALIDA PARA CASO 7.....	58
FIG. 4. 16.- POTENCIAS DE ENTRADA Y SALIDA EN CA Y POTENCIAS INTERNAS EN CD PARA CASO 7.	59
FIG. 4. 17.- POTENCIAS INTERNAS DE CD Y MODULADORAS DE RECTIFICADORES E INVERSORES PARA CASO 7. 60	

CAPÍTULO V

FIG. 5. 1.- DISEÑO DEL ESQUEMÁTICO DEL PCB DEL PUENTE H, A-) ROUTING DEL PCB DEL PUENTE H, B-) PCB EN 3D PUENTE H.....	62
FIG. 5. 2.- PROTOTIPO FINAL DEL TDH.....	63
FIG. 5. 3.- ACCESORIOS DE TEXAS INSTRUMENTS UTILIZADOS EN EL TDH.	64
FIG. 5. 4.- DIAGRAMA DE BLOQUES PARA GENERACIÓN DE PULSOS DE CONTROL ETAPA INVERSORA.	65
FIG. 5. 5.- FORMAS DE ONDA MODULADORAS ETAPA INVERSORA I.	66
FIG. 5. 6.- FORMAS DE ONDA MODULADORAS ETAPA INVERSORA II.	66
FIG. 5. 7.- DIAGRAMA DE BLOQUES PARA GENERACIÓN DE PULSOS DE CONTROL ETAPA RECTIFICADORA.....	67
FIG. 5. 8.- FORMAS DE ONDA DE VOLTAJE Y CORRIENTE A LA SALIDA DEL TDH.	67
FIG. 5. 9.- FORMAS DE ONDA DE VOLTAJE EN LOS TERMINALES DEL PUENTE H, VTA1, VTA2 Y VTA3.	68
FIG. 5. 10.- FORMAS DE ONDA DE VOLTAJE EN LOS TERMINALES DEL PUENTE H, VTA1, VTB1 Y VTC1.....	68
FIG. 5. 11.- PRINCIPALES VARIABLES EN ESTADO ESTABLE.	69
FIG. 5. 12.- COMPORTAMIENTO ANTE UN ESCALÓN DE CARGA.	70
FIG. 5. 13.- COMPORTAMIENTO ANTE UNA DEPRESIÓN DE VOLTAJE DEL 30% DEL VOLTAJE DE ENTRADA.	70
FIG. 5. 14.- COMPORTAMIENTO ANTE DIFERENTES FACTORES DE POTENCIA.	71



ÍNDICE DE TABLAS

ACRÓNIMOS

TABLA I. 1.- ACRÓNIMOS EN TOPOLOGÍA TDH..... XIV

CAPÍTULO III

TABLA 3. 1.- FUNCIONES DE CONMUTACIÓN SPWM DE TRES NIVELES. 27

CAPÍTULO IV

TABLA 4. 1.- DATOS GENERALES DE OPERACIÓN. 40

CAPÍTULO V

TABLA 5. 1.- ESPECIFICACIONES DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL PUENTE H..... 62

CAPÍTULO VI

TABLA 6. 1.- FUNCIONES DEL TDH VS APLICACIONES COTIDIANAS. 74

ACRÓNIMOS

Tabla I. 1.- Acrónimos en Topología TDH.

i: a, b y c	j: 1,2 y 3	<i>Simple</i>	Descripción
	<i>Conjuntos</i>		
V_K		V_A	Voltaje línea neutro fase A del lado de red
		V_B	Voltaje línea neutro fase B del lado de red
		V_C	Voltaje línea neutro fase C del lado de red
		V_{TA}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CA-CD; puente H de la fase A del lado de red
V_{TK}		V_{TB}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CA-CD; puente H de la fase B del lado de red
		V_{TC}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CA-CD; puente H de la fase C del lado de red
V_{DCK}		V_{DCA}	Voltaje en el lado de CD del convertidor CA-CD de la fase A
		V_{DCB}	Voltaje en el lado de CD del convertidor CA-CD de la fase B
		V_{DCC}	Voltaje en el lado de CD del convertidor CA-CD de la fase C
		V_{taa}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CA-CD; puente H 1 de la fase a de alto voltaje
		V_{tab}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CD-CA; puente H 2 de la fase a de alto voltaje
		V_{tac}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CD-CA; puente H 3 de la fase a de alto voltaje
		V_{tba}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CD-CA; puente H 1 de la fase b de alto voltaje
		V_{tbb}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CD-CA; puente H 2 de la fase b de alto voltaje
$V_{tk, i}$		V_{tbc}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CD-CA; puente H 3 de la fase b de alto voltaje
		V_{tca}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CD-CA; puente H 1 de la fase c de alto voltaje
		V_{tcb}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CD-CA; puente H 2 de la fase c de alto voltaje
		V_{tcc}	Voltaje en el lado de CA del convertidor CD-CA; puente H 3 de la fase c de alto voltaje
V_k		V_a	Voltaje línea neutro fase a de salida
		V_b	Voltaje línea neutro fase b de salida
		V_c	Voltaje línea neutro fase c de salida
I_K		I_A	Corriente línea neutro fase A del lado de red
		I_B	Corriente línea neutro fase B del lado de red
		I_C	Corriente línea neutro fase C del lado de red
		I_{DCA}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD de la fase A, antes de condensador C_A
I_{DCK}		I_{DCB}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD de la fase B, antes de condensador C_B
		I_{DCC}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD de la fase C, antes de condensador C_C

	I_{DCA1}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; A,1 de la fase A, después de condensador C_A
	I_{DCA2}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; A,2 de la fase A, después de condensador C_A
	I_{DCA3}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; A,3 de la fase A, después de condensador C_A
	I_{DCB1}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; B,1 de la fase B, después de condensador C_B
	I_{DCB2}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; B,2 de la fase B, después de condensador C_B
	I_{DCB3}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; B,3 de la fase B, después de condensador C_B
$I_{DCK, j}$	I_{DCC1}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; C,1 de la fase C, después de condensador C_C
	I_{DCC2}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; C,2 de la fase C, después de condensador C_C
	I_{DCC3}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; C,3 de la fase, después de condensador C_C
	I_{dca1}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; A,1 de la fase A, después de condensador C_A
	I_{dca2}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; A,2 de la fase A, después de condensador C_A
	I_{dca3}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; A,3 de la fase A, después de condensador C_A
	I_{dcb1}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; B,1 de la fase B, después de condensador C_B
	I_{dcb2}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; B,2 de la fase B, después de condensador C_B
	I_{dcb3}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; B,3 de la fase B, después de condensador C_B
$I_{dck, j}$	I_{dcc1}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; C,1 de la fase C, después de condensador C_C
	I_{dcc2}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; C,2 de la fase C, después de condensador C_C
	I_{dcc3}	Corriente en el lado de CD del convertidor CA-CD; C,3 de la fase, después de condensador C_C
	I_a	Corriente línea neutro fase a de salida
I_k	I_b	Corriente línea neutro fase b de salida
	I_c	Corriente línea neutro fase c de salida

TDH: Transformador de Distribución Híbrido

CA: Corriente Alterna

CD: Corriente Directa

EPRI: Electric Power Research Institute

FACTS: Flexible AC Transmission Systems

CUSTOM POWER: Acondicionadores de potencia

HVDC: High Voltage Direct Current

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

VSC: Voltage Source Converter

DVR: Dynamic Voltage Regulator

D- STATCOMS: Distribution System Static Synchronous Compensators

SST: Solid State Transformer

HF: High Frequency

LFT: Low Frequency Transformer

HVAC: High Volt Altern Current

LVAC: Low Volt Altern Current

HT: Hybrid Transformer

UPQC: Acondicionador de calidad de energía unificado

PWM: Pulse Width Modulation

SPWM: Modulación por ancho de pulso senoidal

NPC: Neutral-Point-Clamped Converter

PF: Power Factor

D-FACTS: Distributed Flexible AC Transmission System

PCB: Printed Circuit Board

DSP: Digital Signal Processor

GPIO: General Purpose Input/Output, Entrada/Salida de Propósito General

ADC: Analog Digital Converter

Capítulo I: Introducción

1.1. Introducción

Con base en los datos obtenidos por el Instituto de Investigaciones de Energía Eléctrica de Palo Alto California, el Electric Power Research Institute (EPRI), aproximadamente el 70% de la energía eléctrica que se suministra actualmente, fluye a través de diferentes etapas de electrónica de potencia, en un futuro próximo dicha cantidad tenderá a crecer hasta un 100% [1]–[4].

En este escenario, las cargas eléctricas en la industria y cargas domésticas residenciales suelen tener una etapa interna de conversión de Corriente Alterna a Corriente Directa (CA/CD) o de Corriente Directa a Corriente Directa (CD/CD) implementando diferentes topologías de convertidores y técnicas de control, pero cabe destacar que en su mayoría, este tipo de conversión tiende a generar corrientes armónicas a diferentes magnitudes y frecuencias [2].

La creciente presencia de corrientes armónicas en las redes eléctricas de distribución debido a la conexión de cargas eléctricas no lineales, así como el comportamiento estocástico en el desbalance de potencia trifásica debido a la conexión y desconexión de las mismas, unido a la integración de fuentes de energía renovable, indudablemente tienden a generar problemas de calidad de la energía tanto a la empresa suministradora como a los usuarios finales del servicio. Bajo este contexto, es importante resaltar que dichos eventos no deseados, tienden a generar efectos negativos en instalaciones eléctricas industriales y residenciales, como: *i)* saturación de líneas, cables y transformadores; *ii)* envejecimiento prematuro de aislamientos y bancos de condensadores; *iii)* circulación de corrientes por el neutro de un sistema trifásico; *iv)* bajo factor de potencia y *v)* desbalances de voltajes trifásicos en la red [26], [29].

Dichos efectos han generado preocupaciones en los sectores industriales y de investigación científica, por lo tanto, en la búsqueda continua para resolver dichas problemáticas, en la literatura científica y en el estado de la técnica de propiedad intelectual, se han propuesto nuevas alternativas en equipos eléctricos-electrónicos.

Estos equipos han sido enfocados a cumplir objetivos básicos como: *i*) regulación de voltaje a los usuarios finales, *ii*) corrección del factor de potencia, *iii*) reducción de la distorsión armónica en las corrientes de carga. Por otro lado, en los últimos años algunas otras propuestas más avanzadas se han enfocado en cubrir problemáticas más específicas como: *i*) balance de potencia trifásica *ii*) regulación de voltaje Volt/VAR en la red de distribución, *iii*) inmunidad ante la pérdida de una o dos fases de voltaje.

Dentro de las propuestas de transformadores inteligentes, para resolver los problemas de calidad de la energía, eficiencia y confiabilidad de la red, es posible hacer una primera clasificación como:

- a) Transformadores electrónicos o de estado sólido.
- b) Transformadores híbridos.

El primero de estos grupos basa su funcionamiento en convertidores de electrónica de potencia e inducción electromagnética a través de un transformador de media frecuencia comúnmente en el rango de 1kHz a 10kHz [5]–[13], mientras que el segundo grupo basa su funcionamiento en un transformador de distribución convencional de 50-60Hz más la adición de uno o varios convertidores de electrónica de potencia, conectado en diferentes puntos del transformador [14]–[16], ver Fig. 1.1.

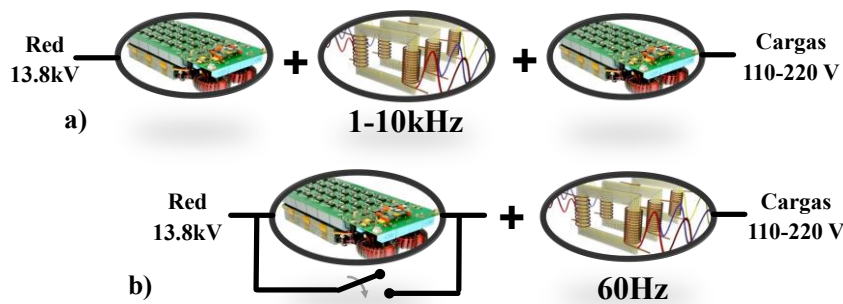


Fig. 1. 1.- Tipos de Transformadores Inteligentes a) Transformador Electrónico
b) Transformador Híbrido

Ambos grupos pueden ser considerados como transformadores convencionales con las funciones de los dispositivos custom power, donde sus atributos de funcionalidad los

colocan como una solución tecnológica para hacer frente a los retos tecnológicos de las futuras redes eléctricas con el incremento de la generación distribuida y redes eléctricas inteligentes [21], [65].

Considerando su similitud como aplicación final, es importante resaltar que el transformador electrónico o de estado sólido tiene la ventaja de lograr una mayor densidad de potencia, pero cabe destacar que ante una falla en alguno de los convertidores de electrónica de potencia el transformador electrónico queda inhabilitado.

Por otra parte, aunque el transformador híbrido no tiende a reducir su tamaño y volumen, este reúne ventajas significativas en su construcción y en la confiabilidad, respecto al transformador electrónico, dichas ventajas son:

- En caso de una falla en los convertidores internos, el transformador híbrido opera como transformador convencional por medio de un interruptor *by pass*.
- Las líneas de producción industrial no sufren cambios significativos en su fabricación. En otras palabras, solo se requiere de la adición de convertidores de electrónica de potencia a los transformadores tradicionales de distribución, sin alterar los procesos de producción actuales.

Dicho lo anterior, para las empresas suministradoras de energía eléctrica y empresas comercializadoras de transformadores de distribución, es de suma importancia contar con estructuras de conversión de electrónica de potencia, eficientes y que logren cumplir la mayoría de los atributos de calidad de la energía deseados en redes de distribución.

1.2. Planteamiento del problema

En la actualidad hay un número creciente de propuestas basadas en electrónica de potencia que buscan resolver los problemas presentes en las redes de distribución. En el análisis del estado del arte, se encontró que las tecnologías existentes no logran ser implementadas como solución técnica integral para resolver todos los problemas de calidad de la energía. En contraste, la mayoría de las propuestas representan solo una alternativa a problemas particulares.

1.3. Hipótesis

Las redes eléctricas en la actualidad enfrentan grandes retos técnicos, y en los próximos años serán en mayor medida. Para ello se requiere de un cambio de paradigma y de soluciones modernas a largo plazo, a lo cual se dirige este proyecto de tesis. De esta manera, se plantean las siguientes hipótesis:

1. Con base en los avances tecnológicos actuales en materiales magnéticos, semiconductores y microprocesadores, es posible sintetizar en un solo dispositivo las características propias de un transformador de distribución convencional como aislamiento galvánico y acondicionamiento de tensión, adjunto a la flexibilidad de convertidores custom power, bajo el concepto de Transformador de Distribución Híbrido.
2. Bajo el mismo concepto, la variación dinámica e independiente de los parámetros de modulación en los convertidores de electrónica de potencia, agregados a un transformador de distribución convencional, permitirá generar una independencia entre los devanados de entrada y salida. Esto significa, que, a diferencia de un transformador convencional, los disturbios de voltaje o de corriente presentes en un devanado no se verán reflejados en el devanado complementario.

1.4. Propuesta de investigación

La fusión de transformadores de distribución más la aplicación de convertidores de electrónica de potencia operando bajo el concepto de Transformador de Distribución Híbrido (TDH), ha demostrado tener el potencial para llevar a cabo tareas específicas necesarias en las futuras redes eléctricas como: fácil interconexión de distintas fuentes de energía en CA y CD, control de flujo de potencia bidireccional entre distintos alimentadores, interconexión con sistemas de almacenamiento de energía, estabilidad de voltaje e inyección de potencia reactiva. Por lo anterior, se propone investigar un transformador convencional con adición de electrónica de potencia, capaz de resolver los problemas existentes en la red de distribución con relación a la calidad de energía.

La Fig. 1.2 muestra la propuesta de la topología del Transformador de Distribución Híbrido, donde se puede observar que consta con una etapa rectificadora de CA/CD compuesta por tres puente H, encargada de mantener la tensión de CD en sus terminales de salida bajo cualquier variación de carga o de voltaje en su entrada, además se muestra una etapa inversora CD/CA, donde se ha implementado una configuración basada en la aplicación de tres convertidores puente H en paralelo con interconexión del tipo fases cruzadas a su salida.

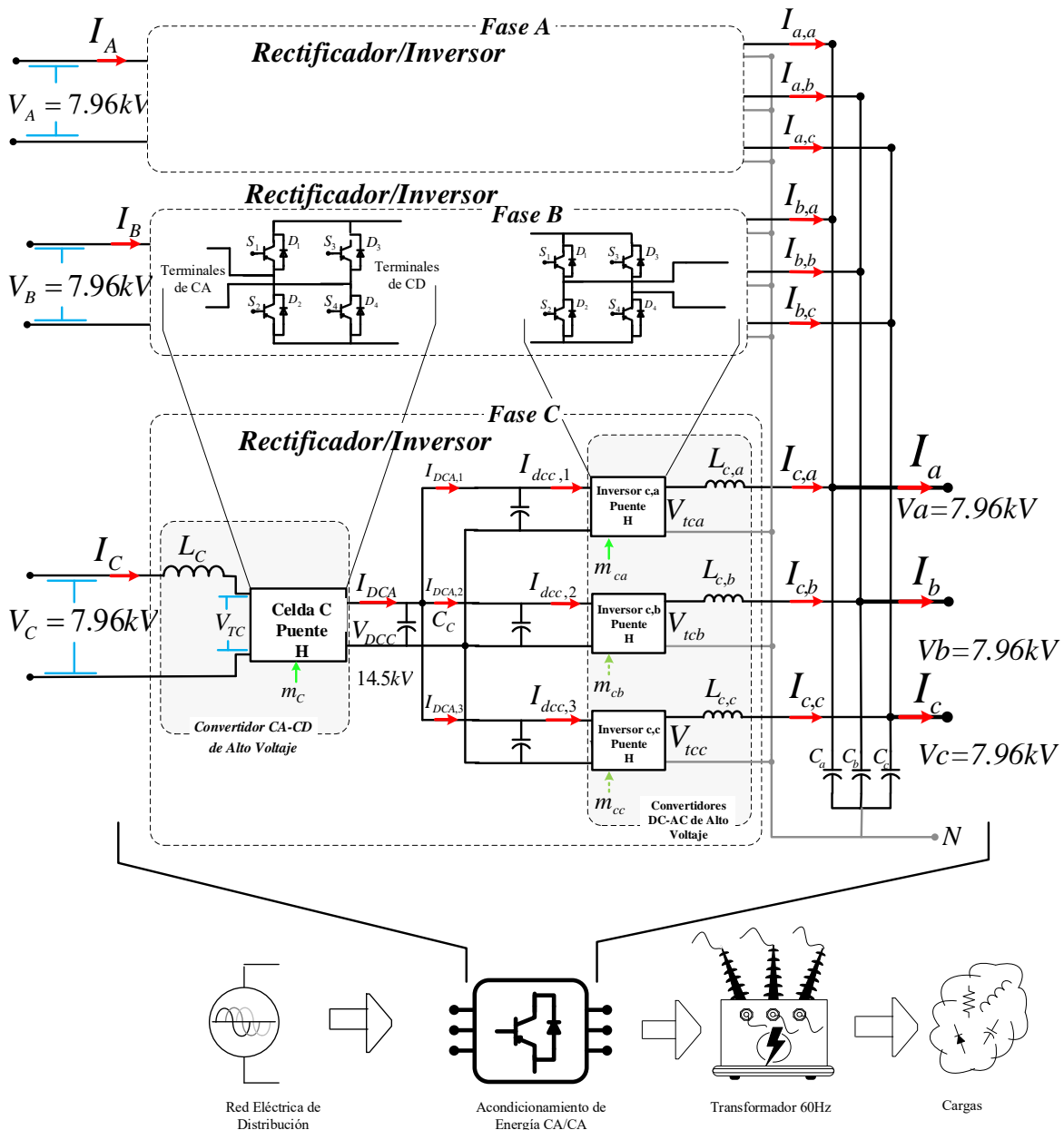


Fig. 1. 2.- Propuesta Topológica del Transformador de Distribución Híbrido

Además, en la Fig. 1.2, se presenta el esquema general del diseño del TDH propuesto, donde se detallan todas las etapas y todos los componentes, en la fase C, mencionando que las fases A y B presentan el mismo diseño que la fase C, en este caso la fase B, solo muestra la topología de puentes H utilizados en las etapas rectificadora e inversora. También, se observa que la propuesta, constituye un sistema de soluciones integradas en un solo esquema cuya operación se convierte en un conjunto de atributos con un impacto importante en la calidad de la energía suministrada, controlado y auto monitoreado bajo diferentes escenarios de operación.

1.5. Objetivo general

Generar el desarrollo del conocimiento científico y tecnológico para el diseño y construcción a escala de un Transformador de Distribución Híbrido que pueda sustituir al transformador de distribución convencional y que además pueda ofrecer diferentes atributos funcionales útiles para mejorar los índices de calidad de la energía.

1.5.1. Objetivos específicos

- Diseñar una estructura de electrónica de potencia óptima, capaz de brindar soluciones a las actuales problemáticas de calidad de la energía, presentes en las redes eléctricas de distribución.
- Desarrollar la modelación matemática y de simulación en plataforma Matlab/Simulink, analizando su desempeño mediante varios casos de estudio típicos de una red eléctrica de distribución.
- Construir físicamente a escala la estructura diseñada y simulada previamente a fin de evaluar experimentalmente en laboratorio diferentes casos de estudio típicos de las redes de distribución.

1.6. Justificación

Actualmente el concepto de Transformador de Distribución Híbrido no se encuentra disponible de manera comercial, sin embargo, en el mercado se pueden ubicar diferentes tecnologías que, de forma separada dan soporte a algunas de las problemáticas de calidad de

la energía en redes de distribución. Dentro de ellas es posible mencionar a los reguladores de tensión o cambiadores de taps bajo carga, restaurador dinámico de voltaje, filtros activos de armónicas y compensadores estáticos de potencia reactiva.

El TDH es un dispositivo que basa su funcionamiento en la aplicación de dispositivos de electrónica de potencia a transformadores de distribución convencionales, donde su mayor ventaja consiste en cumplir con las funciones cotidianas de acondicionamiento de voltaje de un transformador de distribución, pero con los beneficios añadidos de distintos dispositivos custom power y la flexibilidad de interconexión de distintas fuentes de energía eléctrica. En este escenario, el TDH puede ser considerado como un transformador de distribución con las funciones de los dispositivos mencionados, donde las ventajas puntuales son las siguientes:

- ✓ Regulación continua de voltaje en las cargas.
- ✓ Mitigación de corrientes armónicas en el devanado primario.
- ✓ Corrección del factor de potencia.
- ✓ Regulación de voltaje en el primario (Regulación Volt/Var).
- ✓ Balance de potencia trifásica en el primario.
- ✓ Inmunidad ante la pérdida de una o dos fases de entrada.
- ✓ Interconexión con sistemas de almacenamiento.
- ✓ Flujo de potencia bidireccional.
- ✓ Reconfiguración y variación de parámetros a distancia.
- ✓ Alimentación de cargas en CD y CA a diferentes frecuencias y amplitudes.
- ✓ Eliminación de transitorios de encendido Inrush.

Finalmente, se considera que, la realización de este trabajo, permitirá contar con una plataforma experimental, útil para el análisis de los problemas de calidad de la energía presentes en los sistemas eléctricos de distribución. Esto se hará, mediante la tecnología emergente de TDH, la cual representa una sólida línea de investigación global de electrónica de potencia.

1.7. Metodología

La metodología a seguir con el fin de lograr los objetivos y metas trazadas para esta investigación se detallan a continuación:

Análisis del estado del arte: Con base en tópicos relacionados a topologías de electrónica de potencia y técnicas de control aplicadas en publicaciones como “*Smart Transformers; Hybrid Transformers; Solid State Transformers y Power Electronics Transformers*”, se realizará una revisión a fondo de la bibliografía actual reportada en revistas de alto impacto y congresos relevantes, a fin de obtener un respaldo teórico sobre la aplicación del TDH como componente de la red para la distribución de la energía eléctrica.

Diseño y análisis de factibilidad: A partir de las expectativas funcionales del Transformador de Distribución Híbrido, se realizará un análisis cualitativo de las diferentes topologías e interconexiones de la electrónica de potencia, agrupadas en un diseño de un transformador de 75 kVA con una relación de tensión de 13.8 kV/220 V. Con el análisis topológico, será posible definir la mejor arquitectura que servirá de base para el desarrollo del TDH propuesto que cumpla con los requerimientos de funcionalidad.

Modelado y simulación: En esta etapa se trabajará en la validación del desempeño de la topología previamente diseñada, para posteriormente entrar en una etapa de respaldo matemático en donde se representará en forma de ecuaciones las principales características de la arquitectura, incluyendo los componentes pasivos y activos, de conmutación y controles implementados. Posteriormente, se procederá a evaluar su operación y funcionalidad cuantitativa en base a la potencia definida (75 kVA) mediante una serie de simulaciones haciendo uso de herramientas computacionales, como Matlab/Simulink, para llevar a cabo diferentes casos de estudio típicos de un transformador de distribución comercial evaluando las ventajas técnicas de esta propuesta.

Construcción a escala: Con la experiencia acumulada en la etapa de modelado matemático y simulación, el paso subsecuente será el diseño, construcción e implementación del esquema conceptual a escala de un Transformador de Distribución Híbrido en laboratorio (1:100 aproximadamente), con el fin de validar su desempeño real, reproduciendo físicamente a escala dos escenarios de operación simulados.

1.8. Organización de la tesis

A continuación, se describen de forma general los principales aspectos que se desarrollan en cada uno de los capítulos, que conforman el trabajo de tesis:

El **Capítulo I** de este trabajo de investigación, es dedicado a introducir el tema de estudio.

En el **Capítulo II**, se presentan los aspectos generales a la Electrónica de Potencia y las Redes Eléctricas.

En el **Capítulo III**, se presenta la propuesta y modelado de diferentes configuraciones y topologías a utilizar en la investigación.

En el **Capítulo IV**, se muestra la simulación en la plataforma Matlab/Simulink de los diferentes casos de estudio.

En el **Capítulo V**, se presenta el caso práctico a nivel de laboratorio, mostrando al menos dos casos de estudios de los mencionados en el Capítulo IV.

En el **Capítulo VI**, se presentan las conclusiones más relevantes sobre el trabajo de tesis realizado, recomendaciones y trabajos futuros.

Capítulo II: Electrónica de Potencia en Redes Eléctricas

2.1. Introducción

En los últimos años, la Electrónica de Potencia ha contribuido en el desarrollo de nuevas estructuras para el procesamiento de la energía. Se conoce que la Electrónica de Potencia es un campo de investigación orientada a brindar funciones de controlabilidad y flexibilidad a los sistemas eléctricos donde sea necesario su uso [19]. La aplicación de la electrónica de potencia se está expandiendo para una variedad de nuevos equipos de potencia, no solo desde el punto de vista del ahorro de energía, sino también en la supresión del dióxido de carbono [20], [21]. Por otra parte, el uso de electrónica, las telecomunicaciones y las estrategias de control, hacen que las redes eléctricas convencionales, tiendan a evolucionar hacia redes eléctricas inteligentes o *smart grid*.

La electrónica de potencia, definida como “los sistemas electrónicos de conversión de energía o procesadores estáticos de energía eléctrica” representa cada vez un papel más importante. En 2005, el Departamento de Energía de Estados Unidos ya estimaba que el 30% de la energía eléctrica la utiliza entre el punto de generación y el punto de consumo. Para 2030, se preveía que el 80% de toda la energía eléctrica usará este tipo de sistemas. También la visión europea considera la electrónica de potencia una tecnología fundamental, como facilitadora de la calidad y eficiencia de las *smart grid* [1], [22]. En efecto, se está avanzado mucho hacia esa situación, por ejemplo, añadiendo variadores de velocidad a los motores eléctricos, que representan un 28% del consumo de electricidad en el mundo [17]. También mediante el aprovechamiento de soluciones como FACTS [22]-[24], High Voltage Direct Current (HVDC) [22], [25], en redes de transmisión o distribución o la instalación de

convertidores de potencia en plantas de generación eólica, solar, para vehículos eléctricos y para alimentar el transporte ferroviario. Por tanto, estas tecnologías están presentes desde la generación hasta el consumo, tanto en las redes de transporte como de distribución.

2.2. Calidad de la energía

La calidad de la energía eléctrica ha sido siempre una preocupación importante para las empresas de servicio eléctrico [29], considerando dicho término como la ausencia de interrupciones, sobretensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje suministrado al usuario [26]; esto referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico.

De forma más simplificada; calidad de energía eléctrica es el establecimiento de los límites (superior, inferior o ambos), de las variables fundamentales voltaje y corriente a nivel de forma de onda, amplitud, valor eficaz y frecuencia, de forma que la operación dentro de dichos límites sea apta para el funcionamiento correcto de los equipos [27].

2.2.1. Factores que afectan la calidad de la energía

Las diferentes perturbaciones de las redes eléctricas como: interrupciones momentáneas y de larga duración, ruido, distorsión armónica, impulsos, bajo voltaje depresiones y subidas de voltaje, entre otros pueden surgir por una gran variedad de situaciones tales como fallas de equipos y aislamientos, conmutación de bancos de capacitores, energización de transformadores y de motores, entre otros. A continuación, se describirán algunas de estas perturbaciones [27], [28].

2.2.1.1 Interrupciones momentáneas y de larga duración

La definición de una interrupción "momentánea" está sujeta a gran controversia. Ciertamente una interrupción de muchos ciclos no es momentánea, las interrupciones momentáneas son clasificadas como interrupciones en el rango de 0.1 a 1.0 ciclo. Las interrupciones de mayor duración ocurren cuando el voltaje de suministro o de la carga se colapsa por un período de tiempo que no excede un minuto; estas son llamadas interrupciones de corta duración, en las gráficas a) y b) de la Fig. 2.1 se muestran estas perturbaciones en la señal de voltaje en función del tiempo [27], [28].

2.2.1.2 Ruido

El ruido son señales eléctricas no deseadas, ver gráfica c) de la Fig. 2.1, donde se muestra la señal de ruido presente en el voltaje en función del tiempo, con un contenido espectral abajo de los 200 kHz, sobrepuesto en la onda de voltaje o corriente. El ruido puede ser provocado por conexiones defectuosas en el sistema de transmisión o distribución. También puede ser el resultado de la operación de hornos de arco u otros mecanismos en donde la conducción es estocástica [27], [28].

2.2.1.3 Distorsión armónica

La distorsión armónica consiste en voltajes o corrientes sinusoidales que tienen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia del sistema de suministro, ver gráfica d) de la Fig. 2.1, donde se muestra una señal de voltaje distorsionada por un tercer armónico en función del tiempo [27], [28], [29].

2.2.1.4 Impulsos

En la categoría de impulsos asíncronos se encuentran ciertas elevaciones de voltaje debidos a conexión o desconexión de cargas o debidos a descargas atmosféricas. La corriente de magnetización de ciertas cargas puede contener cierto tipo de impulsos. El término impulso se refiere a un voltaje transitorio desarrollado en una prueba de laboratorio. Se distingue del término elevación de voltaje que es un transitorio que se desarrolla en la naturaleza. El impulso transitorio se refiere a un cambio súbito en la condición del estado estable del voltaje, corriente, o ambos, es unidireccional en polaridad, ver gráfica e) de la Fig. 2.1, donde se muestra una señal de impulso sobre una de voltaje en función del tiempo [28].

2.2.1.5 Bajo voltaje

Bajo voltaje se refiere a una disminución en la magnitud del voltaje RMS de CA a menos de 90 por ciento a la frecuencia del sistema por una duración de más de un minuto, ver gráfica f) de la Fig. 2.1 [28].

2.2.1.6 Depresión de voltaje (*Sag*)

Una depresión de voltaje, es mostrada en la gráfica g) de la Fig. 2.1, que consiste en una disminución momentánea en el voltaje o en la magnitud de corriente a la frecuencia del sistema por una duración de 1 ciclo a 10 segundos [28].

2.2.1.7 Elevación súbita del voltaje (*Swell*)

En la gráfica h) de la Fig. 2.1, se muestra un ejemplo de elevación súbita de voltaje, la cual consiste en un aumento de hasta 1.05 p.u. o más en el voltaje o corriente por duraciones de 1 ciclo a 10 segundos [28].

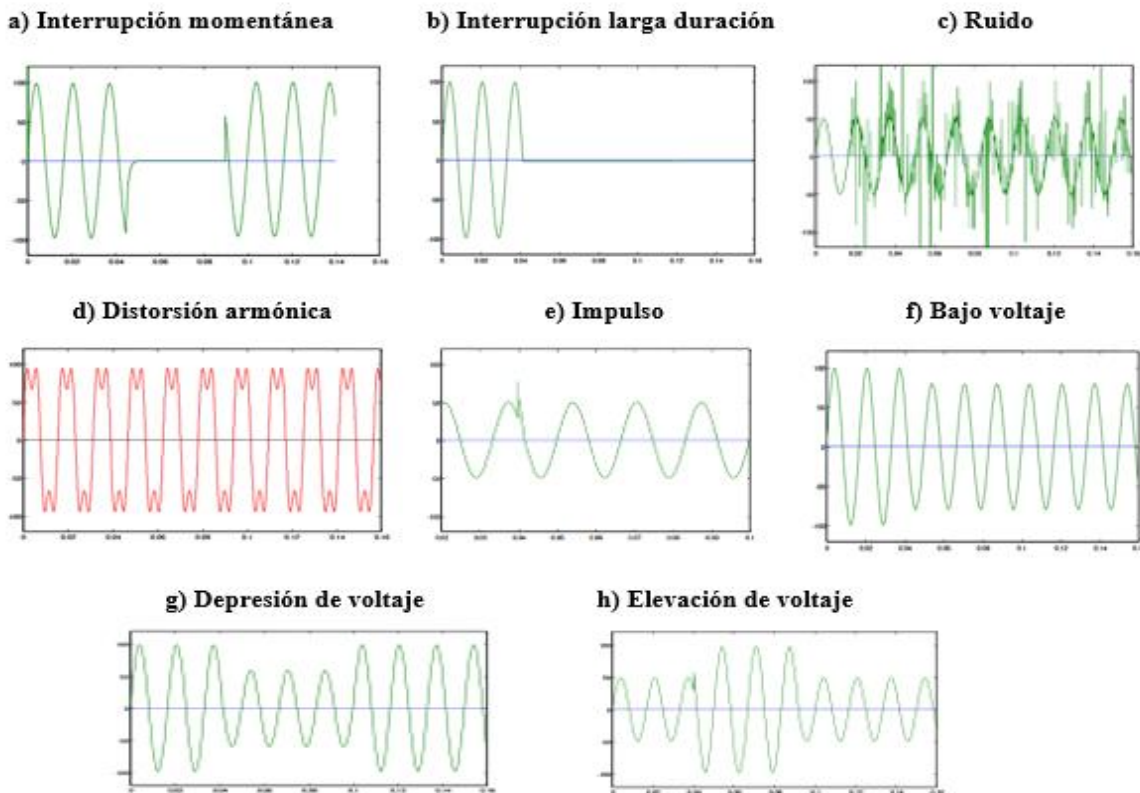


Fig. 2. 1.- Factores que afectan la calidad de la energía.

2.2.2. Antecedentes de solución

Antes de la tecnología de semiconductores IGBT, se han propuesto varias opciones para mitigar los problemas de calidad a lo largo del tiempo, ver Fig. 2.2. Actualmente, la implementación de técnicas industriales como: cambiador de taps, aplicación de filtros analógicos, bancos de capacitores y cancelación de armónicos entre transformadores, no es

suficiente para cubrir todas las necesidades relacionadas con la eficiencia energética y la continuidad del servicio [30].

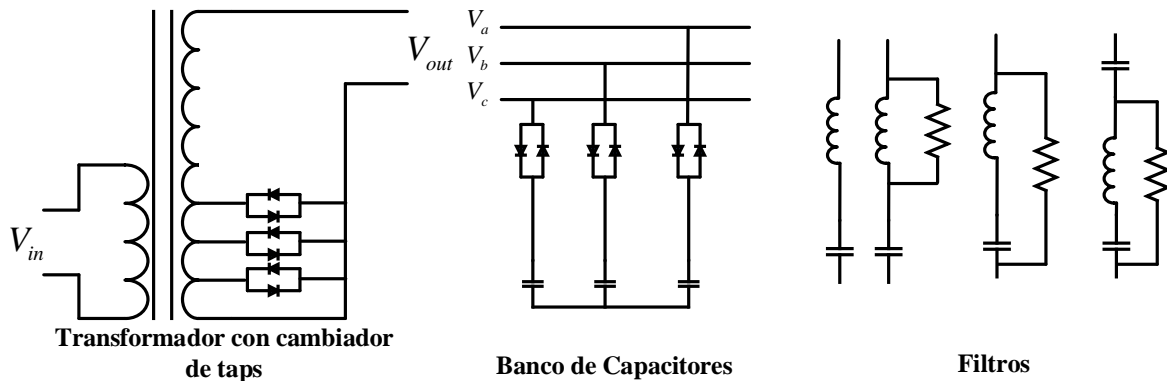


Fig. 2. 2.- Propuesta para mejorar la calidad de la energía

2.2.2.1 Transformador con cambiador de taps

Los transformadores con cambiador de taps contienen un devanado en el que la conexión puede realizarse a lo largo de distintos puntos, permitiendo una regulación discreta de la relación de transformación dentro de un margen relativamente estrecho. Estos transformadores proporcionan una herramienta sencilla de control de tensión en un sistema eléctrico [28],[30].

2.2.2.2 Bancos de capacitores

Los bancos de capacitores automáticos están integrados con componentes de alta calidad, los cuales ofrecen una amplia gama de capacidades y pasos. El uso más común de un banco de capacitores es la corrección del factor de potencia de la fuente de alimentación de CA en entornos industriales que utilizan una gran cantidad de transformadores y motores eléctricos, debido a que estos equipos usan una gran carga inductiva, son susceptibles a cambios de fase y retardos del factor de potencia en la fuente de alimentación. [30],[31].

2.2.2.3 Filtros

Los filtros de armónicos son equipos que se encargan de resolver los conflictos generados por la distorsión armónica. El uso de los filtros de armónicos ayuda a limitar las fluctuaciones de tensión y controlar el grado de contaminación armónica en un sistema específico [28].

Existen tres tipos de filtro: **i)** Filtro pasivo, que no es más que un circuito LC sintonizado a cada una de las frecuencias de armónicos a filtrar, en paralelo con el dispositivo generador de armónicos. Este circuito de derivación absorbe los armónicos y evita que circulen por la alimentación. **ii)** Filtro activo, reinyecta en fase opuesta los armónicos que circulan por la carga, de tal forma que la corriente de línea permanece sinusoidal. Tiene su aplicación en instalaciones comerciales con un conjunto de generadores de armónicos de potencia total inferior a aproximadamente 200 kVA. **iii)** Filtro híbrido, no es más que los dos tipos de dispositivos presentados anteriormente combinados en un único dispositivo, constituyéndose así un filtro híbrido. Esta nueva solución de filtrado combina las ventajas de las soluciones existentes y proporciona un buen comportamiento cubriendo un amplio rango de potencia [32].

2.2.3. Dispositivos custom power

Desde finales de la década de los años ochenta hasta principios de la década de los noventa, con la invención del IGBT [33], se han abierto nuevas formas de solución de calidad de energía como custom power, que no son más que aplicaciones basadas en convertidores de potencia VSC, ver Fig. 2.3. Los sistemas custom power tienen el potencial de mitigar la principal problemática de la calidad de la energía en las redes eléctricas, como: mejora del factor de potencia, distorsión armónica de corriente y mantener la estabilidad de la tensión en un nodo, para satisfacer todas estas necesidades, se requiere la aplicación de varios dispositivos como restauradores dinámicos de voltaje (DVR, por sus siglas en inglés), sistema de compensadores estáticos síncronos de distribución (D-STATCOMS por sus siglas en inglés) y filtros activos en la red.

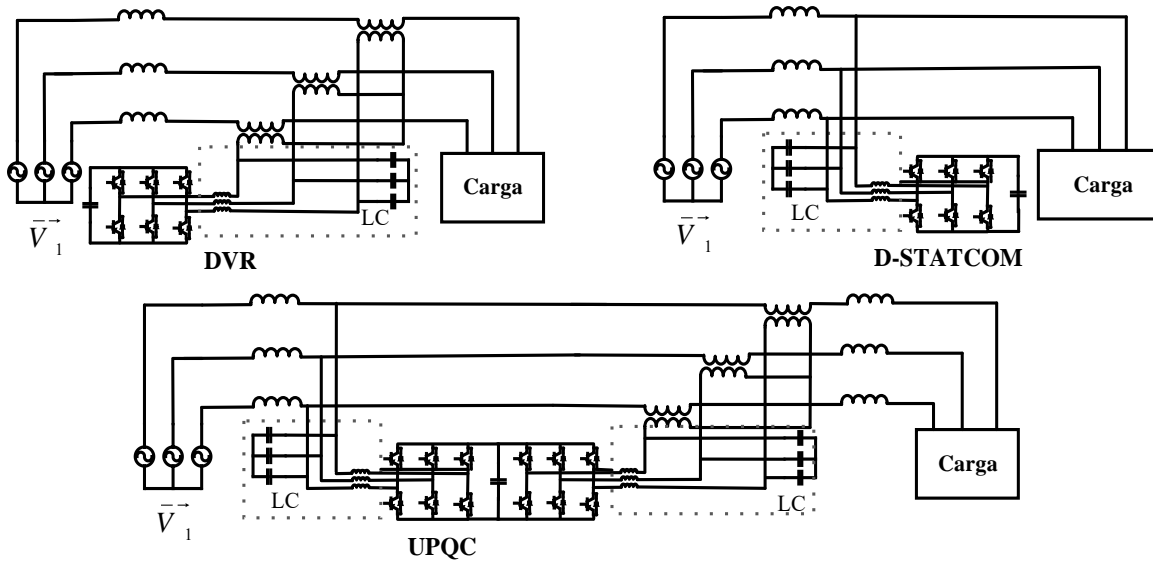


Fig. 2. 3.- Principales sistemas custom power

2.2.3.1 Restaurador dinámico de voltaje

Es un convertidor electrónico de potencia que protege cargas críticas de disturbios en el voltaje de alimentación. El principio de operación del DVR es controlar el voltaje aplicado a la carga, inyectando o absorbiendo un voltaje que compensa la amplitud y ángulo de fase a la línea de distribución. El grado de exactitud del voltaje de salida del DVR depende del comportamiento dinámico y cuan exacto sea el esquema de control [34][35].

2.2.3.2 Sistema de compensadores estáticos síncronos de distribución

El D-STATCOM es un dispositivo basado en VSC conectado en derivación con el sistema de energía, se compone de tres partes principales: un convertidor CA/CD, un conjunto de reactores de acoplamiento y un controlador. La transferencia de potencia activa y reactiva entre el sistema de potencia y el D-STATCOM es causada por la diferencia de voltaje a través de los reactores. Dicha diferencia de voltaje es generada a partir de los controles y modulaciones implementados al convertidor, logrando así mejorar el factor de potencia o regulación de voltaje Volt/VAR [34][36].

2.2.3.3 Acondicionador de calidad de energía unificado

La configuración más completa de los filtros híbridos es el acondicionador de calidad de energía unificado (UPQC, por sus siglas en inglés), también conocido como filtro activo

universal. El UPQC es un acondicionador de energía multifuncional que se puede usar para compensar varias perturbaciones de voltaje de la fuente de alimentación, para corregir la fluctuación de voltaje y evitar que la corriente de carga armónica ingrese al sistema de energía [37], [38].

2.3. Estado del arte del transformador electrónico o de estado sólido

Una de las líneas de investigación, es el transformador de estado sólido (SST, por sus siglas en inglés), ver Fig. 2.4, que tiene por objeto sustituir el transformador convencional de distribución de 50/60 Hz mediante técnicas de conversión en alta frecuencia usando componentes de estado sólido para lograr un convertidor CA/CA [39].

El concepto de SST fue introducido por primera vez en 1968 por McMurray [40], quien propuso un dispositivo basado en interruptores de estado sólido con aislamiento mediante un transformador de alta frecuencia (HF) que se comportaba como un transformador convencional. En la década de 1980, Brook, en una patente sobre un convertidor de CA / CA de HF [41], puso de relieve la capacidad de acondicionamiento de la forma de onda del voltaje de salida.

Una aplicación real para el SST surgió en la década de los años noventa, en sistemas de tracción donde la reducción de peso y volumen son altamente deseables y las soluciones clásicas se basaron en transformadores de baja frecuencia (LFT), lo que llevó a un sistema muy voluminoso, pesado e ineficiente. La tecnología SST podría ofrecer varios beneficios a este respecto, como la reducción de volumen y peso (alrededor de 20 a 50%) y la mejora de la eficiencia (de 93 a 96%) [39].

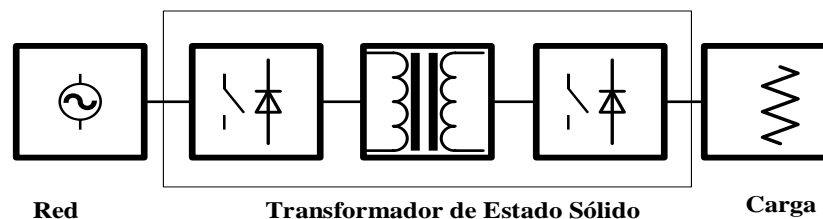


Fig. 2. 4.- Transformador de estado sólido. Concepto básico.

En [42] se abarcan las topologías de los transformadores electrónicos que pueden ser clasificados en cuatro configuraciones básicas, esta clasificación se muestra en la Fig. 2.5, donde se le dan los nombres de tipo A, B, C y D, estos tipos se detallan a continuación. Cabe mencionar que estas topologías son bidireccionales.

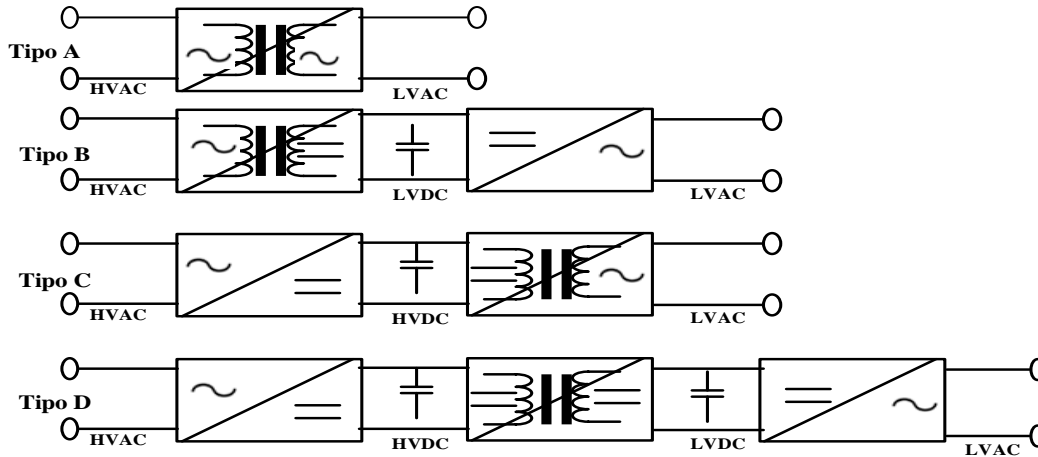


Fig. 2. 5.- Clasificación de las topologías básicas de los SST.

Tipo A: Se da un cambio directo de alta tensión (HVAC, por sus siglas en inglés) a baja tensión (LVAC, por sus siglas en inglés) en corriente alterna. Estas topologías son de bajo costo y peso debido a su configuración simple. Esta configuración es inadecuada para aplicaciones donde se requiera compensación de potencia reactiva, ya que se necesita el bus CD para poder realizar la compensación. También, las perturbaciones que sucedan de un lado afectan el otro lado, que es un problema que se tiene con los transformadores actuales.

Tipo B: Esta configuración tiene un aislamiento en la conversión CA/CD que proporciona la baja tensión, seguido por el inversor para la baja tensión. En esta configuración igual que para la C, la compensación de potencia reactiva es posible.

Tipo C: Igual que para el tipo B, se tienen dos estaciones de conversión. El aislamiento galvánico se encuentra del lado de baja tensión.

Tipo D: para estas configuraciones se tienen tres etapas en la conversión de la energía, como se muestra en la Fig. 2.5, primero se pasa de corriente alterna a directa en alta tensión, luego con ayuda de un transformador de alta frecuencia se aísla galvánicamente la carga de la fuente mientras se baja la tensión mediante un convertidor CD/CD. Por último, se transforma la tensión directa a alterna en baja tensión.

Basado en la electrónica de potencia, un transformador de distribución podría ser un buen candidato para implementar nuevas funciones en forma de servicios auxiliares, pero como se ha mencionado anteriormente, los transformadores electrónicos aún tienen la desventaja de salir de operación ante una falla en las etapas de electrónica de potencia.

2.4. Transformador Híbrido

Debido a la creciente integración de generadores distribuidos, la red enfrenta desafíos conceptuales. Para garantizar una operación eficiente y confiable, es necesario tener activos más controlables en las redes futuras. El transformador, como uno de los componentes más importantes, posee solo capacidades de control limitadas en la actualidad. Al combinar un transformador convencional con un convertidor, se obtiene un transformador híbrido con las capacidades mencionadas anteriormente.

En [43], se aborda un concepto emergente que combina un transformador de 60Hz con un convertidor electrónico de potencia para formar un TH. El convertidor electrónico de potencia permite el control de diferentes parámetros, esto permite combinar la alta eficiencia y el bajo costo de un transformador convencional con la flexibilidad de un convertidor electrónico de potencia. A diferencia de los SST, la potencia aún puede transferirse si el convertidor electrónico de potencia falla, de modo que se garantiza la confiabilidad del sistema en general.

En [44], se realiza un estudio de protecciones, bajo diferentes escenarios de fallas en redes de baja y media tensión, el TH, debe soportar voltajes y sobrevoltajes, que se definen por la infraestructura de protección de la red existente. En este caso la presencia del LFT en el TH, disminuye el estrés de voltaje y corriente en el convertidor. Para el convertidor de 40 kVA investigado, la aplicación de un concepto de protección reduce la eficiencia del convertidor de 95.5% a 95% y la densidad de potencia en 0.95 kW. El rendimiento del sistema TH no se deteriora significativamente debido a la clasificación fraccional del convertidor. Por lo tanto, el TH es una solución prometedora para mejorar la calidad de la energía de la red, incluso con la infraestructura de protección de red convencional.

En [45], tratan cuatro configuraciones diferentes de TH, donde se muestra a través de pruebas de laboratorio la versatilidad de este TH y una de las ventajas principales, el convertidor se puede omitir completamente en caso de una falla dentro de este; en este caso, el transformador vuelve a comportarse como un transformador de distribución normal.

En [46], se muestra el estudio de un estabilizador de voltaje de CA basado en un transformador híbrido trifásico combinado con un convertidor de matriz. La solución propuesta se utiliza para controlar la amplitud del voltaje de CA y el cambio de fase.

Con el objetivo de mejorar la regulación de voltaje por medio de un banco de condensadores adjunto a un transformador de distribución, en [47], se muestra la aplicación de un dispositivo separado, extraíble y acoplado de manera desmontable al transformador principal. El dispositivo está conectado a las tres fases del secundario del transformador principal y puede incluir un banco de tres condensadores conectados en estrella o una combinación de transformadores pequeños y condensadores.

Cabe mencionar que dicha invención, aun no considera la adición de un convertidor de electrónica de potencia, por lo que las funciones del transformador para mejorar los índices de calidad de la energía, se ven limitados solo a la regulación de tensión por medio de condensadores.

Por otra parte, en [48], se muestra la protección intelectual a 10 topologías diferentes de TH monofásicos, todas con el objetivo de controlar el factor de potencia en el lado primario del transformador y reducir las variaciones en el voltaje de salida en caso de un cambio en el voltaje de entrada. El dispositivo de conversión, consta de un convertidor en puente H conectado a un banco de baterías en el puerto de CD, a través de un interruptor, mientras que el puerto de CA se conecta al transformador en diferentes puntos de este.

En [49], se muestra la protección intelectual de dos topologías diferentes de TH monofásico. El transformador híbrido incluye un convertidor CA/CA, un núcleo ferromagnético y devanados primario, secundario y terciario enrollados alrededor del mismo núcleo. Al menos uno de los devanados primarios secundario o terciario es utilizado para la conexión del voltaje de entrada de CA, otro de los devanados es utilizado para la alimentación a las cargas y el último devanado es designado para la conexión del dispositivo CA/CA.

El control designado para el dispositivo CA/CA, tiene como objetivo compensar el factor de potencia y realizar una regulación continua de voltaje en las cargas ante las variaciones de tensión presentes en el lado secundario.

ABB Research LTD., Zúrich (CH), presenta un transformador trifásico híbrido, del cual hace la protección de la propiedad intelectual en varios países, donde se pueden mencionar las siguientes patentes:

- Patente USA [50]
- Patente Europea [51]
- Patente WIPO [52]

- Patente China [53]

Se proporciona un transformador de distribución versátil que tiene un transformador electromagnético y un sub-módulo de convertidor de electrónica de potencia. Este submódulo tiene conectores unidos eléctricamente en al menos un devanado del transformador convencional, que de forma adjunta va montado al mismo.

El módulo del convertidor de electrónica de potencia puede ser extraíble, montado en una cavidad del tanque principal del transformador. Dicho módulo incluye una variedad de dispositivos de conmutación de semiconductores y una variedad de conectores adaptados para encajar de manera deslizante en los conectores del transformador principal. La extracción de dicho módulo de la cavidad del transformador, hace que este opere en modo reductor de voltaje de forma tradicional, mientras que, en su posición instalada, las uniones eléctricas hacen que automáticamente el transformador opere en su modo híbrido.

Por parte de General Electric Company, en [54], se muestra la protección intelectual de tres estructuras diferentes de TH monofásico. Las estructuras de esta invención se dirigen a un sistema de control de calidad de la energía de forma integrada, donde se incluye a un transformador de distribución con un devanado de compensación activa enrollada en el mismo núcleo principal a fin de compensar las fluctuaciones de voltaje. La estructura de electrónica de potencia empleada, consta de un convertidor en puente H unido a un convertidor de medio puente en sus terminales de CD.

En [55] se hace la protección de la propiedad intelectual de dos estructuras de transformador híbrido monofásico. Específicamente se muestra un sistema de distribución de energía compuesto por dos o más transformadores con núcleos ferromagnéticos separados, pero conectados eléctricamente entre sí. Uno de los transformadores opera como transformador principal para la alimentación de cargas, mientras que el segundo actúa como una fuente activa en conjunto con el convertidor de electrónica de potencia. Esta combinación se hace tanto para el devanado primario, como para el devanado secundario.

El convertidor de electrónica de potencia puede ser conectado o desconectado a través de un interruptor *by pass* en conjunto con elementos inductivos y capacitivos que actúan como filtrado pasivo. Dentro de las propiedades de operación de dichas estructuras, puede considerarse la regulación activa de voltaje en las cargas y la corrección del factor de potencia en el devanado primario.

En [56], se muestra la protección intelectual de más de 10 configuraciones diferentes para un transformador de distribución convencional con una interface de electrónica de potencia conectada en el devanado secundario en serie con las cargas. Finalmente, también se incluye la protección intelectual de distintos controles aplicados a los convertidores de electrónica de potencia de las diferentes configuraciones.

Por otra parte, en [57], se muestra la protección intelectual a cuatro estructuras diferentes de TH trifásico, todas con el objetivo de controlar el factor de potencia en el lado primario del transformador y reducir las variaciones en el voltaje de salida en caso de un cambio en el voltaje de entrada. El transformador de distribución comprende al menos tres devanados y al menos dos núcleos ferromagnéticos, adjuntos a un convertidor de electrónica de potencia CA/CA el cual es utilizado para compensar las fluctuaciones de tensión a la entrada y de esta forma mantener una correcta regulación y balanceo de voltaje en las cargas.

El convertidor CA/CA implementado consta de un convertidor *back to back* monofásico basado en convertidores en puente H para las primeras dos combinaciones, mientras que para las dos estructuras complementarias se implementa un convertidor *back to back* trifásico basado en estructuras multinivel NPC.

2.5. Análisis crítico del estado de la técnica

Con base en lo anterior, es necesario mencionar que en este documento se han citado las técnicas y estructuras de transformadores híbridos más relacionadas a la topología propuesta. En común, es posible mencionar que la mayoría de estas se han enfocado a cumplir con la regulación de voltaje en las cargas, mejorar el factor de potencia y reducir la distorsión armónica de corriente debido a cargas no lineales, donde en todas estas estructuras, el convertidor de electrónica de potencia, solo opera como un sistema compensador y no gestiona la potencia total de energía en la carga y en el transformador de distribución.

En este contexto es necesario mencionar que ninguna estructura analizada considera una distribución equitativa o promediada de potencia entre las fases de un sistema trifásico a través de una estructura de fases cruzadas, bajo este escenario ninguna invención desarrollada muestra la capacidad de mantener un continuo balance de potencia, con generación independiente de potencia reactiva entre fases y la conservación de energía en las cargas ante una caída de tensión, en una o dos fases de entrada.

Finalmente, este trabajo de tesis, propone el esquema de electrónica de potencia útil en la conversión de corriente CA/CA, basada en una topología denominada fases cruzadas. Donde esta topología es útil para producir un Transformador de Distribución Híbrido, orientado para su aplicación en transformadores de distribución trifásicos de diferentes potencias de entre 25kVA y 100kVA con relaciones de tensión aproximadas a 13.8kV/220V. Dentro de los importantes atributos de conversión de energía de esta propuesta, se encuentran:

- La potencia de entrada por fase es considerada como una tercera parte de la sumatoria de las tres potencias de salida, por lo tanto, existe un intercambio de potencia entre las fases de entrada y salida, lo cual genera un continuo balance de potencias a la entrada.
- La presencia de disturbios de tensión en el devanado primario del transformador híbrido, no se verán reflejadas en las tensiones del devanado secundario.
- La pérdida de voltaje de una fase en la entrada de alimentación a la etapa de alto voltaje no genera ninguna pérdida de voltaje en ninguna de las fases de salida.
- Las etapas rectificadoras son capaces de conservar un factor de potencia unitario y una baja distorsión armónica en la corriente de entrada.
- Las potencias reactivas de entrada son mutuamente excluyentes entre las potencias reactivas de salida.
- En base al sistema de fases cruzadas es posible reducir el rizo de tensión y corriente en las cargas del devanado secundario.
- La implementación del sistema de fases cruzadas genera ventajas a la eficiencia y reduce las pérdidas de energía en las resistencias parásitas de los elementos de filtrado.

Una vez analizados los puntos anteriores en los casos de estudio expuestos, es posible deducir que la estructura de conversión CA/CA propuesta en este trabajo de tesis, tiene el potencial para la rápida implementación de Transformadores de Distribución Híbridos, generando así diversas ventajas técnicas a las redes de distribución, con el potencial suficiente de sustituir a diferentes dispositivos compensadores como bancos de capacitores y elementos de filtrado.

Capítulo III:

Propuesta y Modelado de las Diferentes Topologías

3.1. Introducción

En este capítulo se aborda el convertidor conmutado puente H completo, cuyo principio de funcionamiento sirve como base para obtener el modelado del Transformador de Distribución Híbrido permitiendo la obtención de su principio de operación, así como sus funciones de conmutación. Posteriormente se obtienen los modelos matemáticos, tanto en el dominio del tiempo, como en el dominio de la frecuencia del convertidor puente H. En otro apartado de este capítulo se presenta el modelado de la topología del transformador.

3.2. Modelo de transformador convencional

3.2.1. Transformador ideal

El transformador ideal es una máquina eléctrica con un bobinado de entrada y un bobinado de salida, que mantiene una relación entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida, además de una relación entre la corriente de entrada y la corriente de salida. Los transformadores ideales son formas idealizadas de los transformadores reales, el cual el núcleo no tiene pérdidas, los devanados no tienen resistencia y que no existe dispersión de flujo entre los devanados [58].

3.2.1.1 Modelo del transformador ideal

La Fig. 3.1 nos indica que en el núcleo tiene enrollado una cantidad de número de espiras tanto en el bobinado primario N_1 como en el secundario N_2 .

La relación entre el voltaje V_1 aplicado al lado primario del transformador y el voltaje V_2 producido en el lado secundario, está dado por la ecuación (3.1).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (3.1)$$

La relación del número de vueltas de espiras en el transformador está expresada como $\alpha = \frac{N_1}{N_2}$. Al suministrar un voltaje en el bobinado primario, se produce una corriente en dicho devanado, donde la relación de corriente primaria I_1 y la corriente secundaria I_2 , expresada mediante el número de espiras, se muestra en la ecuación (3.2) [58].

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.2)$$

3.2.2. Transformador real

Con el transformador en vacío, por el bobinado primario circula una corriente, que se descompone en una I_p que está en fase con la tensión (en este caso la fuerza electromotriz del primario E_1 que representa las pérdidas en el núcleo). Estas pérdidas, para una frecuencia fija, según se presenta en las redes de suministro eléctrico, son función del flujo magnético elevado al cuadrado $k\Phi_{max}^2$, y siendo el mismo proporcional a la fuerza electromotriz E_1 , se coloca en un circuito equivalente una resistencia llamada R_p , que representa las mencionadas pérdidas P_h , y que debe cumplir:

$$P_h = \frac{E_1^2}{R_p} \quad (3.3)$$

3.2.2.1 Modelo del transformador

La Fig. 3.1 muestra el modelo equivalente de un transformador real ya con la resistencia parásita, la rama de magnetización y una carga conectada al secundario [58].

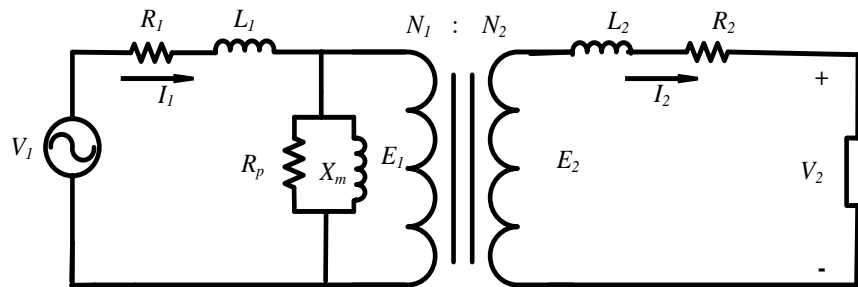


Fig. 3. 1.- Modelo equivalente del transformador real.

Del esquema de la Fig. 3.1, recorriendo el circuito primario y secundario se obtiene:

El voltaje en el primario:

$$V_1 = E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1 \quad (3.4)$$

FEM inducida en el secundario:

$$E_2 = V_2 + R_2 I_2 + jX_2 I_2 \quad (3.5)$$

Donde:

R_1 : Resistencia del primario

R_2 : Resistencia del secundario

X_1 : Reactancia del primario

X_2 : Reactancia del secundario

3.3. Convertidor puente tipo H

3.3.1. Modelo del convertidor puente H

El convertidor puente H es una estructura de electrónica de potencia capaz de realizar conversión CA/CD y CD/CA, por lo tanto, es ampliamente usado en sistemas de energías renovables fotovoltaicos y drivers de motores de baja potencia.

El convertidor puente H está formado por dos pares de transistores de potencia que forman el brazo A (S_1 y S_2) y el brazo B (S_3 y S_4) cambiando de estado alternadamente [59], [60]. Cuando los transistores S_1 y S_4 se encuentran en estado de corte y los transistores S_2 y S_3 en estado de saturación, el voltaje en la resistencia R_L es V_{CD} . Cuando los transistores S_1 y S_4 se encuentran en estado de saturación y los transistores S_2 y S_3 en estado de corte, el voltaje en la resistencia R_L es $-V_{DC}$ [59], [60]. Se tiene que tener especial cuidado en que los

transistores S_1 y S_2 o S_3 y S_4 no se encuentren al mismo tiempo en estado de saturación, ya que esto provocaría un corto circuito en la fuente de voltaje.

Con una apropiada secuencia de cambio de estado en los dos brazos de transistores, se puede obtener una salida pulsante de voltaje alterno, en el lado de carga R_L . Por lo tanto, el convertidor puente H, muestra el proceso de conversión CA/CD básico donde se obtiene una forma de onda cuadrada a la salida. Dicha forma de onda también puede ser modificada al aplicar sistemas de modulación con variaciones en el ancho de pulso de los dispositivos de potencia [61].

En la Fig. 3.2 se puede observar, en a), la configuración de un convertidor puente H y en b), la forma de voltaje en sus terminales de salida [62].

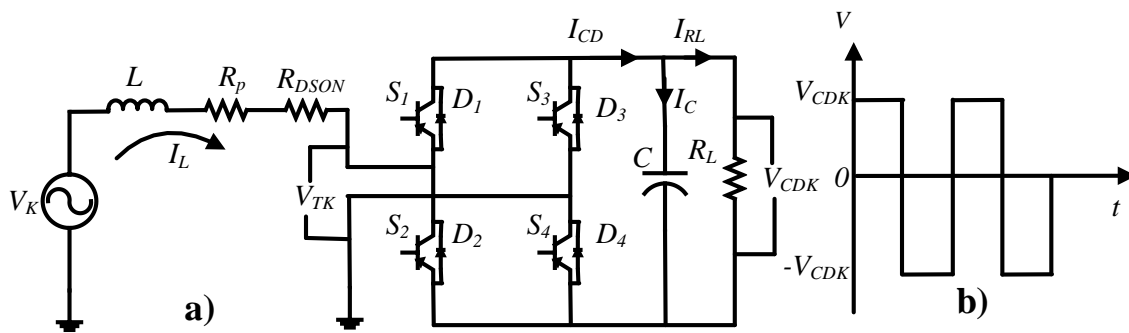


Fig. 3. 2.- Convertidor CA/CD puente H completo.

Para un esquema SPWM de tres niveles, las funciones de conmutación S_1 y S_2 del convertidor se definen como se muestra en la Tabla 3.1, donde S_1 es el complementario de S_2 y S_3 es el complementario de S_4 .

Tabla 3. 1.- Funciones de conmutación SPWM de tres niveles.

$S_1 = \overline{S_2}$	$S_3 = \overline{S_4}$	V_{TK}	I_{CD}
1	0	V_{CD}	I_L
1	1	0	0
0	0	0	0
0	1	$-V_{CD}$	$-I_L$

Para fines demostrativos, es conveniente analizar el caso en el que el V_{TK} funciona con tres niveles de voltaje, definidos en el conjunto $\{+V_{CD}, 0, -V_{CD}\}$, gobernados por las

funciones de conmutación S_1 y S_3 , definidos en el conjunto discreto $\{0, 1\}$, se puede concluir que las consideraciones mencionadas anteriormente dan como resultado un sistema discreto; por otra parte, suponiendo una conmutación de frecuencia, f_{com} , diez veces más alta que la frecuencia de línea, f_{line} , es decir, $f_{com} > 10 f_{line}$, luego mediante un modelo promediado puede ser válido según el índice de modulación variable "D" definido como una variable sinusoidal en el conjunto continuo $[-1, 1]$, que se puede usar para representar el promedio (en un ciclo de conmutación) del voltaje y las relaciones de corriente del rectificador [24]. Utilizando la tabla 3.1 y el índice de modulación D , estos se pueden expresar utilizando la operación local promedio durante el período de conmutación $T_{com} = (1/f_{com})$.

$$V_{PWM} = \int_t^{t+T_{com}} (S_1 - S_3)V_{CD} ds = D * V_{CDK} \quad (3.6)$$

$$I_{CD} = \int_t^{t+T_{com}} (S_1 - S_3)I_L ds = D * I_L \quad (3.7)$$

3.3.2. Modelo matemático en el dominio del tiempo del convertidor puente H

Las ecuaciones de voltaje en el dominio del tiempo del rectificador son:

$$\frac{d(I_L)}{dt} = -\frac{R_{DSOn} + R_p}{L} I_L - \frac{V_{CD}}{L} D + \frac{1}{L} V_K \quad (3.8)$$

$$\frac{d(V_{CDK})}{dt} = \frac{1}{C} I_{CD} - \frac{V_{CDK}}{C * R_L} \quad (3.9)$$

La potencia de entrada y salida transferida (entre el nodo de distribución V_K y el nodo de recepción junto con I_L), pueden ser obtenidas mediante las ecuaciones equivalentes (3.8) y (3.9), además, los circuitos equivalentes de CA y CD, se pueden representar por fuentes de voltaje y de corriente dependientes, como se observa en la Fig. 3.3 [62].

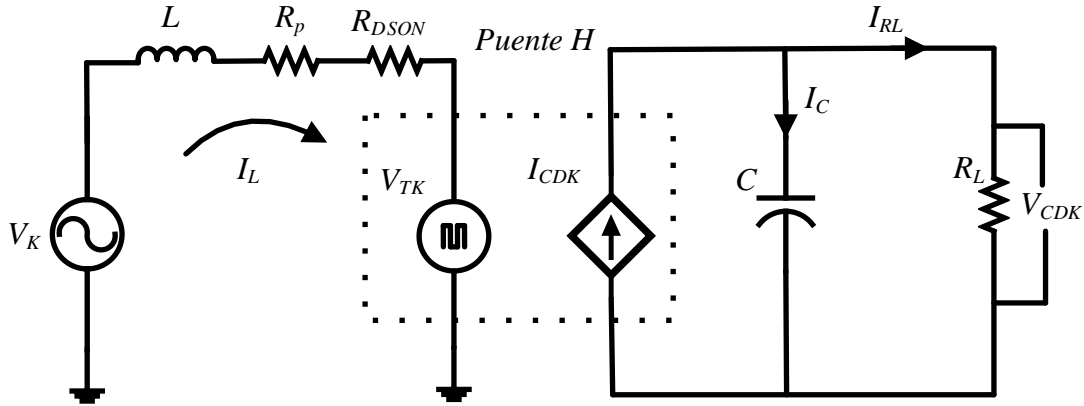


Fig. 3. 3.- Circuito equivalente del rectificador monofásico PWM de puente H activo.

3.3.3. Principio de funcionamiento

Asumiendo que el vector V_K es paralelo al eje real en el plano complejo, entonces puede tomar la forma:

$$V_K = |V_K| * \sin(\omega t) \quad (3.10)$$

V_L adelanta a I_L . Para calcular un factor de potencia PF unitario independientemente de la magnitud de V_L , I_L debería tener la forma

$$V_L \approx A_X * \cos(\omega t) \quad (3.11)$$

y

$$|I_L| \approx \left| \frac{V_L}{X_L} \right| \quad (3.12)$$

En (3.11), A_X representa la magnitud del vector de voltaje aplicado a L como se muestra en la Fig. 3.4 para un sistema sin pérdidas ($R_p + R_{DSON} = 0$). La magnitud y la fase del vector V_{TK} se pueden variar dinámicamente para mantener la cuadratura de V_L y V_K .

Al analizar la Fig. 3.4, es posible confirmar que V_L depende tanto de V_K como de pequeños aumentos en la fase y la magnitud de V_{TK} . Esta característica ayuda a mantener la forma de onda sinusoidal en su forma de onda nominal, garantizando así una baja distorsión armónica en I_L , independientemente de su propia magnitud.

Para compensar la potencia reactiva en el lado de CA del circuito en la Fig. 3.3, la tensión a través del rectificador es controlada por el vector V_{TK} usando:

$$V_{TK} \approx V_K - A_X * \cos(\omega t) \quad (3.13)$$

La Fig. 3.4 muestra el diagrama vectorial de las principales variables del circuito de CA en diferentes magnitudes y ángulos (φ) para el vector V_{TK} ubicado en el primer cuadrante. V_{TK} se define como:

$$|V_{TK}| = \sqrt{V_K^2 + V_L^2} \quad (3.14)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{V_K}{V_L}\right) \quad (3.15)$$

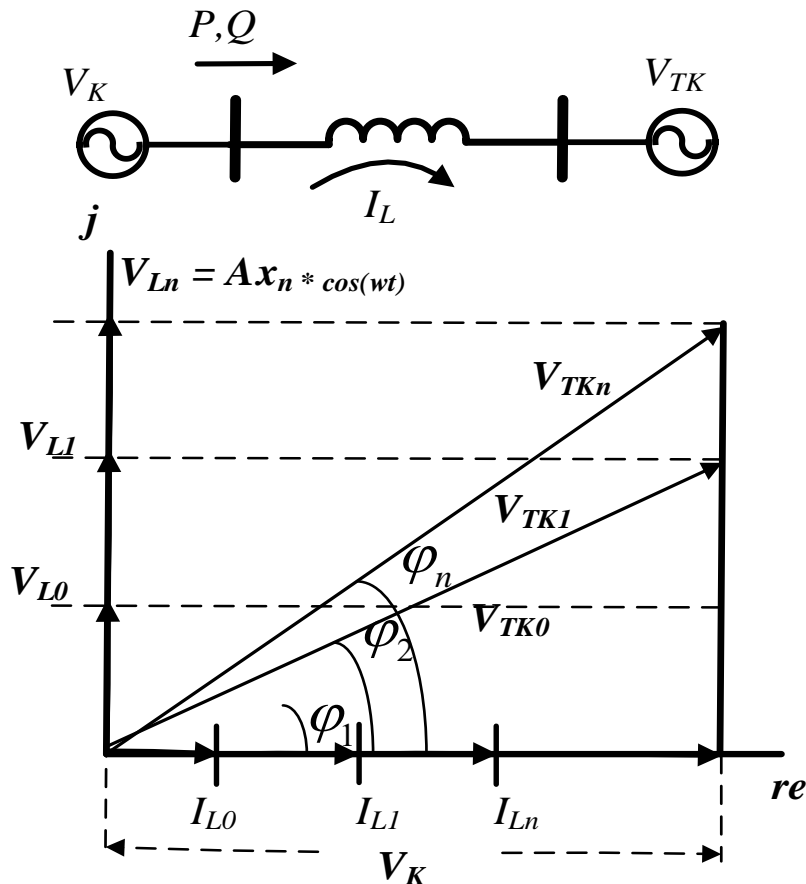


Fig. 3. 4.- Espacio vectorial V_{TK} para el rectificador monofásico.

Si $V_K = \text{constante}$ (en magnitud y fase), entonces la potencia activa, P , magnitud inyectada en el lado de CA del rectificador se puede controlar, con base en (3.13), mediante A_X . Por lo tanto, P puede expresarse como:

$$P = \frac{V_K * V_{TK}}{2X_L} \sin(\varphi) \quad (3.16)$$

donde, A_X permanece como la única variable de control.

3.3.4. Modelo del puente H en el dominio de la frecuencia

La energía almacenada W_{CD} en el capacitor C de la Fig. 3.3 es:

$$W_{CD} = \frac{1}{2} C * V_{CD}^2 \quad (3.17)$$

W_{CD} depende de la diferencia entre la potencia inyectada a la entrada del circuito de CD, P_{CDin} y la potencia a la salida, P_{CDout} , la cual se defino como:

$$\frac{d(W_{CD})}{dt} = \frac{1}{2} C * \frac{d(V_{CDK}^2)}{dt} = P_{CDin} - P_{CDout} \quad (3.18)$$

P_{CDin} , está dado por:

$$P_{CDin} = I_{CD} * V_{CDK} \quad (3.19)$$

Sustituyendo (3.7) en (3.19), P_{CDin} es:

$$P_{CDin} = D * I_L * V_{CD} \quad (3.20)$$

P_{DCout} es la potencia entregada a la carga R_L , la cual está dada por:

$$P_{DCout} = \frac{V_{CD}^2}{R_L} \quad (3.21)$$

Sustituyendo (3.20) y (3.21) en (3.18), resolviendo el lado de CD o la función de transferencia de V_{CDK} , y aplicando una transformada de Laplace, se encuentra:

$$V_{CDK}(s) = \frac{D * I_L}{1/2sC + 1/R_L} \quad (3.22)$$

Para el lado de CA o la función de transferencia de I_L , aplicando una transformada de Laplace en (3.8) se encuentra

$$sL * I_L(s) = -(R_{DSO} + R_P)I_L(s) + (V_K - D * V_{CDK}) \quad (3.23)$$

Resolviendo para I_L de (3.23), se encuentra

$$I_L(s) = \frac{V_K - D * V_{CDK}}{sL + R_{DSO} + R_P} \quad (3.24)$$

La ecuación (3.24) expresa a I_L en función de V_K y D . Las ecuaciones (3.22) y (3.24) representa el lado de CA (V_K e I_L) y el lado de CD del rectificador (V_{CDK}), respectivamente.

3.4. Control de voltaje de CD

Antes de obtener una ley de control dedicada a regular V_{CDK} y mantener el rectificador en factor de potencia unitario, primero es necesario obtener un espacio para determinar D . Esto se puede hacer mediante las ecuaciones (3.6) - (3.13), lo que da:

$$D = \frac{V_K - A_X * \cos(wt)}{V_{CD}} \quad (3.25)$$

Sea D expresado en el dominio de la frecuencia como:

$$D(s) = \frac{V_K(s) - A_X(s/s^2 + w^2)}{V_{CDK}(s)} \quad (3.26)$$

La potencia activa que fluye a través del circuito de la Fig. 3.3 depende de V_L , que a su vez depende de A_X . Por esta razón, A_X es la variable de interés para controlar V_{CDK} en condiciones de circuito cerrado.

Como una forma de realizar un método para mejorar la capacidad de control, se introduce una nueva variable de referencia V_{CD_ref} y un bloque PI en el lazo de control original. Bajo estas consideraciones, A_X puede expresarse como:

$$A_X \approx (V_{CD_ref} - V_{CDK}) \left[K_p \frac{(s + K_i/K_p)}{s} \right] \quad (3.27)$$

Al sustituir (3.27) en (3.26), D se puede reescribir como:

$$D(s) = \frac{V_K(s) - (V_{CD_ref} - V_{CDK}(s)) [K_p(s + K_i/K_p)/s](s/s^2 + w^2)}{V_{CDK}(s)} \quad (3.28)$$

Debido a que V_{CDK} siempre es más grande, en magnitud, que V_K , la ecuación (3.28) muestra que $1 < D < 1$ con el mismo espacio de vector operativo que V_{TK} . El esquema de control completo se muestra en la Fig. 3.5.

El esquema, construido utilizando V_{CDK} de (3.22) y (3.24), considera las características dinámicas del voltaje y la corriente de V_{CDK} en la topología del convertidor puente H. El lazo de retroalimentación externo es un PI implementado de acuerdo con (3.28), que utiliza V_{CD_ref} y V_{CDK} como referencias constantes, está destinado a controlar la tensión del bus de CD.

Este esquema también permite obtener $PF = 1$ (el espacio de trabajo del vector V_{TK} asegura un factor de potencia unitario) y mantenerse para una amplia gama de valores de carga utilizando un solo circuito de retroalimentación.

Esto proporciona la característica sin sensor para este esquema de control. Los controladores PI no tienen sistema de compensación (como es necesario si las referencias son sinusoidales) y no requieren una transformación dq0. La estructura de control, implementada en base a las ecuaciones. (3.22), (3.24) y (3.28), se muestra en la Fig. 3.5.

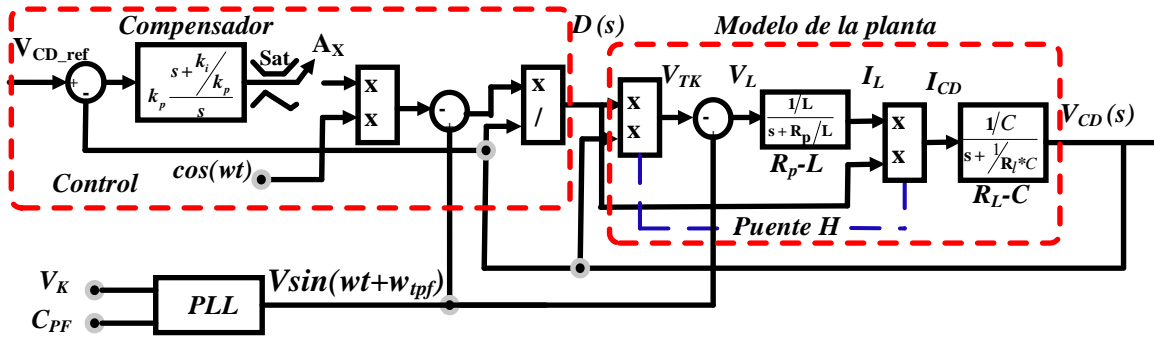


Fig. 3. 5.- Controlador y modelo de planta para el rectificador PFC monofásico.

3.5. Control de reactivos

Como se observa en la Fig. 3.5, la variable w_{tpf} proviene de la suma de dos señales, una es adquirida a la salida de un sistema *PLL* y la otra se obtiene de un valor constante preestablecido llamado C_{PF} , la cual es una constante.

Cabe mencionar que con la manipulación de C_{PF} , es posible variar el factor de potencia del rectificador monofásico, debido a que la suma $w_t + w_{tpf}$, tiende a cambiar el ángulo de referencia de V_{Ln} , como se observa en la Figura 3.5 y en consecuencia se modifica el ángulo de operación de la corriente respecto al voltaje o el factor de potencia.

Específicamente en esta tesis, sólo se realizan cambios en el factor de potencia del sistema, pero dicha función se puede ampliar para mejorar las características de la red de distribución en trabajos futuros.

3.6. Propuesta y modelado de la topología del TDH

3.6.1. Descripción de la Topología

Para el análisis de voltajes y corrientes internos de la topología mostrada, Fig. 3.6, se ha designado la siguiente nomenclatura:

- Todos los subíndices en mayúscula $K \in \{A, B, C\}$ indican voltajes, corrientes, potencias y elementos, en las etapas de conversión, comprendidas entre la red de distribución y las etapas de CD.
- Todos los subíndices en minúscula $k \in \{a, b, c\}$ indican voltajes, corrientes, potencias y elementos en las etapas de conversión de alto voltaje, comprendidas entre las etapas de CD y la alimentación de cargas a la salida.

- El número de voltajes, corrientes, potencias y elementos internos por fase son designados por $i \in \{1,2,3\}$.

Para explicar el proceso de conversión de energía en la topología se toma como ejemplo la “Fase C”, considerando que las fases complementarias generan comportamientos similares.

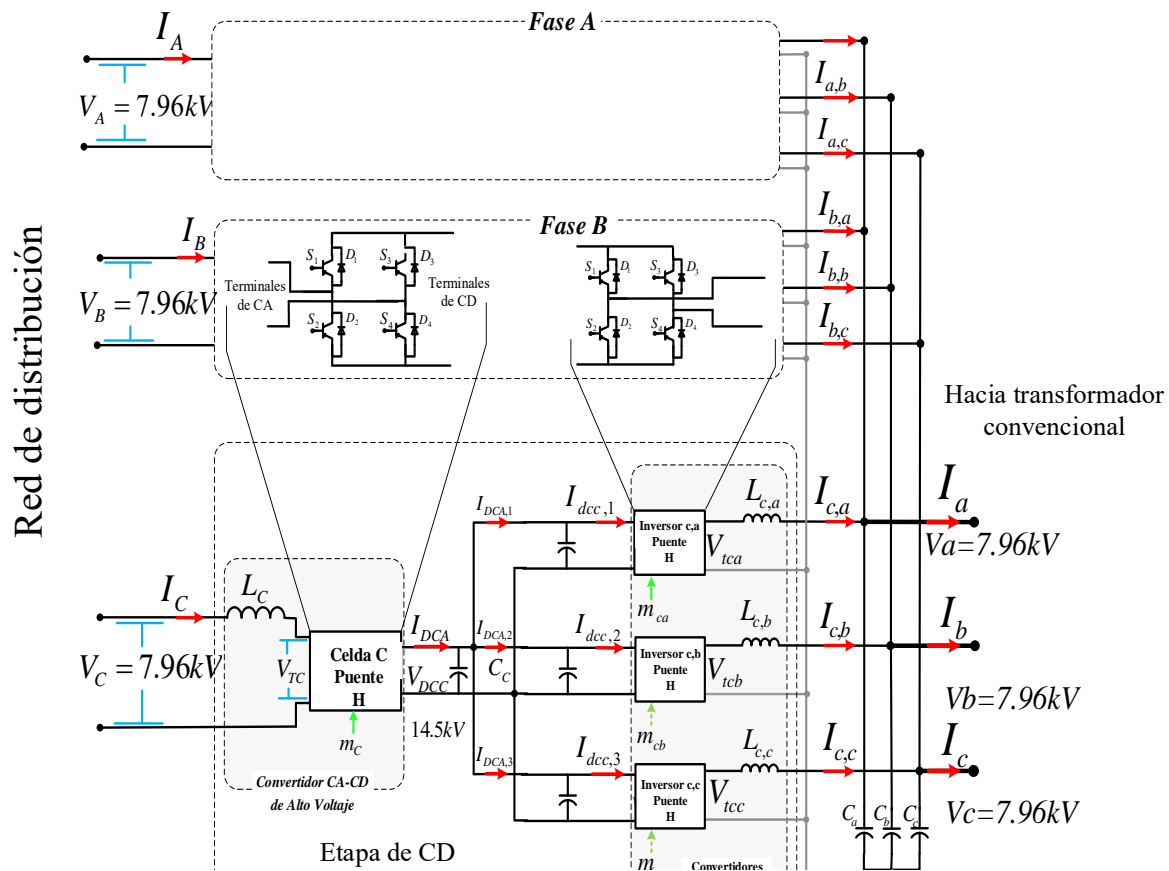


Fig. 3. 6.- Topología del Transformador de Distribución Híbrido.

3.6.2. Etapa de rectificación (conversión CA-CD)

El objetivo básico del convertidor CA-CD basado en convertidor puente H, es mantener una tensión de CD estable a su salida ante distintos niveles de carga y variaciones de tensión en la entrada de CA, sin perder las características de un factor de potencia unitario y una baja distorsión armónica de corriente a la entrada.

Al implementar los modelos promediados de convertidor puente H, detallados en [62], la etapa rectificadora CA-CD está compuesta por un convertidor en puente H y una inductancia con su resistencia, llamada L_C , por la cual fluye la corriente I_C , que va desde la

red de distribución de CA de alto voltaje ($V_C = 7.96\text{kV}$) hacia las terminales de CA, del convertidor “Celda C en puente H” controlado por la variable moduladora m_C .

En las terminales de CD del mismo convertidor (V_{DCC}) se tiene la conexión en paralelo del condensador C_C , el cual mantiene en estado estable un voltaje de corriente directa de 14500V , cargándose por medio de la corriente I_{DCC} y descargándose a través de las corrientes I_{DCC1} , I_{DCC2} e I_{DCC3} , las cuales fluyen hacia las terminales de CD de los convertidores puente H llamados H_{ca} , H_{cb} y H_{cc} .

Las principales ecuaciones referentes al comportamiento de las variables de la etapa de conversión CD-CD, son descritas de (3.29) a (3.34). La tensión de entrada obtenida de la red de distribución, puede definirse como:

$$V_C(t) = 11250 * \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.29)$$

En (3.30), se describe la tensión V_{TC} generada en las terminales de CA del convertidor rectificador en puente H.

$$V_{TC}(t) = m_C(t) * V_{DCC}(t) \quad (3.30)$$

La ecuación de malla de CA, referente a la circulación de la corriente I_C , es descrita por (3.31).

$$L \frac{d(I_C(t))}{dt} = -R_{PC} * I_C(t) - V_{TC}(t) + V_C(t) \quad (3.31)$$

La corriente de I_{DCC} , obtenida en las terminales de CD del convertidor rectificador puente H, se define por (3.32) como:

$$I_{DCC}(t) = m_C(t) * I_C(t) \quad (3.32)$$

En (3.33) se describe la ecuación de divisor de corriente entre los convertidores y el condensador I_C .

$$I_C(t) = I_{DCC}(t) - I_{DCC,1}(t) - I_{DCC,2}(t) - I_{DCC,3}(t) \quad (3.33)$$

Mientras que la magnitud de tensión V_{DCC} de alto voltaje generada en base a la corriente I_C y el valor de capacitancia C es descrito por (3.34).

$$V_{DCC}(t) = \frac{1}{C_C} \int I_C(t) * dt \quad (3.34)$$

3.6.3. Etapa inversora (Convertidor CD-CA de alto voltaje)

Esta etapa de conversión de energía, es encargada de proporcionar alimentación al devanado primario de un transformador de distribución convencional, donde dicha etapa

consiste en un arreglo de dispositivos semiconductores de potencia que, en conjunto con una etapa de filtrado, son capaces de convertir voltaje de CD a formas de onda de tensión en CA con baja distorsión armónica, aplicando comúnmente una modulación SPWM.

Específicamente en la topología expuesta en la Fig. 3.6 se ha implementado una configuración basada en la aplicación de tres convertidores puente H en paralelo con interconexión del tipo fases cruzadas a su salida, resaltando así las ventajas significativas obtenidas tales como: a) mayor eficiencia; b) menor distorsión armónica de voltaje a la salida V_c ; c) menor desplazamiento de fase y d) mejor regulación de voltaje ante cambios de carga, donde estas ventajas sobrepasan las características de un convertidor puente H simple como etapa de la salida del TDH para la alimentación de cargas trifásicas por separado, o la aplicación de un convertidor trifásico. Por otra parte, la aplicación del arreglo propuesto también trae consigo ventajas significativas en relación al balance de corrientes en la entrada del TDH.

De la Fig. 3.6 se aprecia la última etapa de conversión CD-CA, con base en los convertidores puente H llamados H_{ca} , H_{cb} y H_{cc} ; los cuales son controlados por las variables moduladoras m_{ca} , m_{cb} y m_{cc} . Cabe resaltar que, hasta este punto de conversión de energía, los procesos por fase han operado por separado, pero, en esta nueva etapa, se realiza una interconexión en la parte de CA con las tensiones generadas por las mismas etapas de las fases complementarias A y B.

Específicamente el inversor H_{ca} se interconecta con el inversor H_{aa} y con el inversor H_{ba} , pertenecientes a la Fase A y Fase B del TDH respectivamente, los cuales generan una serie de tensiones de CA llamadas V_{taa} , V_{tba} y V_{tca} , controladas por la misma variable de modulación m_a , cumpliéndose que $m_a = m_{aa} = m_{ab} = m_{ac}$. Dichos convertidores son conectados en paralelo con el condensador de salida C_a , a través de las impedancias de acoplamiento L_{aa} , L_{ab} y L_{ac} , realizando este mismo proceso de manera paralela para los inversores H_{cb} y H_{cc} .

Dicho esquema de interconexión es denominado fases cruzadas, el cual ha sido propuesto en [63], [64], donde como ya se ha mencionado, el objetivo principal es realizar un balance continuo de potencias en el primario del TDH, independientemente de los desbalances de potencias demandadas en el secundario del transformador, así como reducir la distorsión armónica de voltaje de salida. Las principales ecuaciones referentes al

comportamiento de las variables de la etapa de conversión CD-CA, son descritas de (3.35) a (3.46).

Las relaciones de CA generadas por los inversores de la fase C pueden ser descritas como:

$$V_{tca}(t) = m_{ca}(t) * V_{DCC}(t) \quad (3.35)$$

$$V_{tcb}(t) = m_{cb}(t) * V_{DCC}(t) \quad (3.36)$$

$$V_{tcc}(t) = m_{cc}(t) * V_{DCC}(t) \quad (3.37)$$

Mientras que las corrientes generadas en las terminales de CD de cada inversor son de la forma:

$$I_{dcca}(t) = m_{ca}(t) * I_{c,a}(t) \quad (3.38)$$

$$I_{dccb}(t) = m_{cb}(t) * I_{c,b}(t) \quad (3.39)$$

$$I_{dccc}(t) = m_{cc}(t) * I_{c,c}(t) \quad (3.40)$$

Finalmente, la distribución de corrientes finales de salida $I_a(t)$, $I_b(t)$ e $I_c(t)$, en base a la operación de los nueve inversores puente H implementados, tienen un comportamiento de la forma.

$$I_a(t) = I_{a,a}(t) + I_{b,a}(t) + I_{c,a}(t) \quad (3.41)$$

$$I_b(t) = I_{a,b}(t) + I_{b,b}(t) + I_{c,b}(t) \quad (3.42)$$

$$I_c(t) = I_{a,c}(t) + I_{b,c}(t) + I_{c,c}(t) \quad (3.43)$$

La generación de las variables moduladoras m_{ki} , pueden representarse como:

$$m_a(t) = m_{a,a}(t) = m_{b,a}(t) = m_{c,a}(t) \quad (3.44)$$

$$m_b(t) = m_{a,b}(t) = m_{b,b}(t) = m_{c,b}(t) \quad (3.45)$$

$$m_c(t) = m_{a,c}(t) = m_{b,c}(t) = m_{c,c}(t) \quad (3.46)$$

Donde dichas variables, no son dependientes de ningún control, éstas solo se han definido como índices de modulación en lazo abierto.

3.7. Análisis cuantitativo del comportamiento de las potencias del TDH

El comportamiento general de potencias activas de entrada y salida del Transformador de Distribución Híbrido mostrado en la Fig. 3.6 es de la forma:

$$P_A = P_B = P_C = \frac{1}{3}(P_a + P_b + P_c) \quad (3.47)$$

La potencia de salida puede ser expresada en función de las corrientes y voltajes de CA y CD del lado de baja tensión, de la forma.

Donde, ϕ , es el coseno del ángulo de la carga conectada.

$$P_a \approx (V_a * I_a * \cos(\phi_a)) \approx \left[V_a \sum_{k=a}^c I_{a,k} \right] \approx \sum_{k=a}^c (I_{dck,1} * V_{dck,1}) \quad (3.48)$$

$$P_b \approx (V_b * I_b * \cos(\phi_b)) \approx \left[V_b \sum_{k=a}^c I_{b,k} \right] \approx \sum_{k=a}^c (I_{dck,2} * V_{dck,2}) \quad (3.49)$$

$$P_c \approx (V_c * I_c * \cos(\phi_c)) \approx \left[V_c \sum_{k=a}^c I_{c,k} \right] \approx \sum_{k=a}^c (I_{dck,3} * V_{dck,3}) \quad (3.50)$$

La potencia de entrada puede ser expresada en función de las corrientes y voltajes de CA y CD del lado de alta tensión, de la forma.

Donde, γ , es el coseno del ángulo formado a la entrada del transformador.

$$P_A \approx (V_A * I_A * \cos(\gamma_A)) \approx (V_{DCA} * I_{DCA}) \approx \left[V_{DCA} \sum_{i=1}^3 I_{DCA,i} \right] \quad (3.51)$$

$$P_B \approx (V_B * I_B * \cos(\gamma_B)) \approx (V_{DCB} * I_{DCB}) \approx \left[V_{DCB} \sum_{i=1}^3 I_{DCB,i} \right] \quad (3.52)$$

$$P_C \approx (V_C * I_C * \cos(\gamma_C)) \approx (V_{DCC} * I_{DCC}) \approx \left[V_{DCC} \sum_{i=1}^3 I_{DCC,i} \right] \quad (3.53)$$

Una vez realizado un análisis de los diferentes modelos de las etapas del TDH y sus potencialidades, el paso subsecuente consiste en su implementación en plataforma Matlab/Simulink a fin de comprobar los diferentes escenarios de operación.

Capítulo IV: Casos de Estudio

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan la validación mediante simulaciones del modelado presentado en el Capítulo 3 de este trabajo de tesis. En un inicio se describen los principales esquemáticos desarrollados en la plataforma de Matlab/Simulink. Posteriormente se muestran los resultados de los seis casos de estudios realizados, así como las conclusiones particulares para cada escenario propuesto.

4.2. Descripción del esquemático de simulación

La simulación del Transformador de Distribución Híbrido propuesto se ha realizado en plataforma Matlab-Simulink®, a fin de corroborar analíticamente el desempeño básico de los distintos convertidores y etapas interconectadas operando en conjunto en base a las modulaciones, compensadores y leyes de control propuestos. Considerando lo anterior se pretende analizar las diferentes respuestas dinámicas de voltaje, corriente y potencia obtenidas, en conjunto a los casos de estudio propuestos.

Como expectativa de la simulación del TDH, se espera definir a detalle los controles que generen respuestas transitorias aceptables e identificar las áreas de trabajos futuros en este mismo tema.

Partiendo de los datos de la tabla 4.1, referentes a las características, elementos y constantes de entrada y salida del TDH diseñado, se ha elaborado un esquemático de simulación.

Tabla 4. 1.- Datos generales de operación.

Parámetros		Valor	
Voltaje de Entrada		V_K	7.96 kVRMS
Voltaje de Salida		V_k	7.96 kVRMS
Potencia activa por fase		P_K	25 kW
Potencia reactiva por fase		Q_K	± 15 kVAr
Etapa de conversión CA-CD	Elementos	L_K	150mH - 5Ω
		C_K	50 μ F
	Controlador	V_{DCK_ref}	14500V
		K_p	1
		K_i	25
Etapa de conversión CD-CA	Elementos	L_{kk}	1mH - 0.05Ω
		C_k	10 μ F

La selección de los datos de operación de este TDH, se realizó en el fundamento de tomar como referencia un transformador trifásico de distribución de una capacidad término medio, de los que existen actualmente; partiendo de esa idea, se decidió por uno de 75kVA.

La Fig. 4.1, muestra el esquemático del Transformador de Distribución Híbrido, donde se pueden observar las diferentes partes que lo conforman. Comenzando por la red de distribución (recuadro rojo), con un voltaje de 13.8 kV de línea a línea, considerada como un bus infinito de carga.

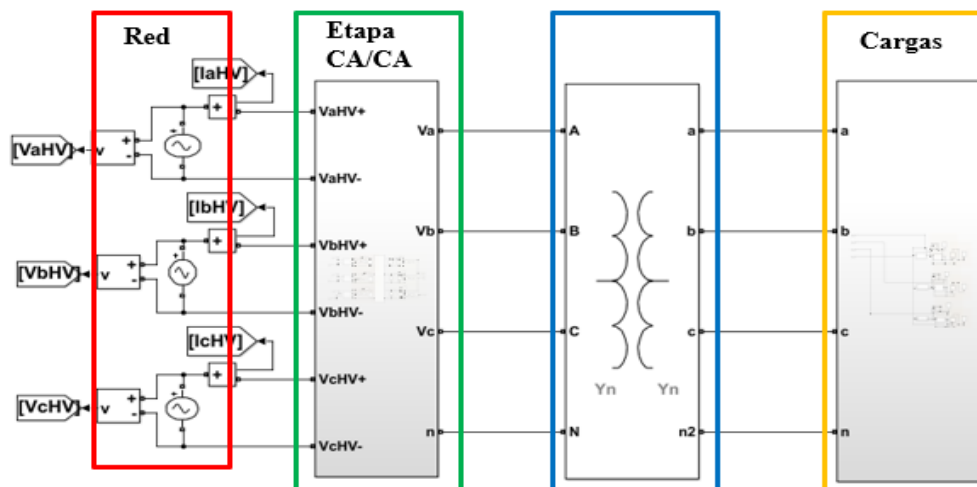


Fig. 4. 1.- Esquemático del TDH en Matlab/Simulink.

En el recuadro verde, se pueden observar las etapas de conversión de CA/CD/CA, donde utilizando el método de fases cruzadas, se realiza todo el acondicionamiento de la potencia. Es necesario destacar que esta etapa del TDH, es la principal contribución de este trabajo de tesis.

En azul se muestra una representación de un transformador convencional, el más sencillo, encontrado en la biblioteca del Matlab/Simulink. Por último, el recuadro amarillo, representa los diferentes tipos de cargas e interruptores para generar dinámicas y casos de estudio.

Cabe destacar, que, para mostrar el propósito de este trabajo de tesis, solo se ha simulado la parte de electrónica de potencia mostrada en la Fig. 4.2, donde se pueden observar las etapas de conversión CA-CD y CD-CA, enmarcadas por los recuadros azules, así como los principales elementos inductivos y capacitivos internos.

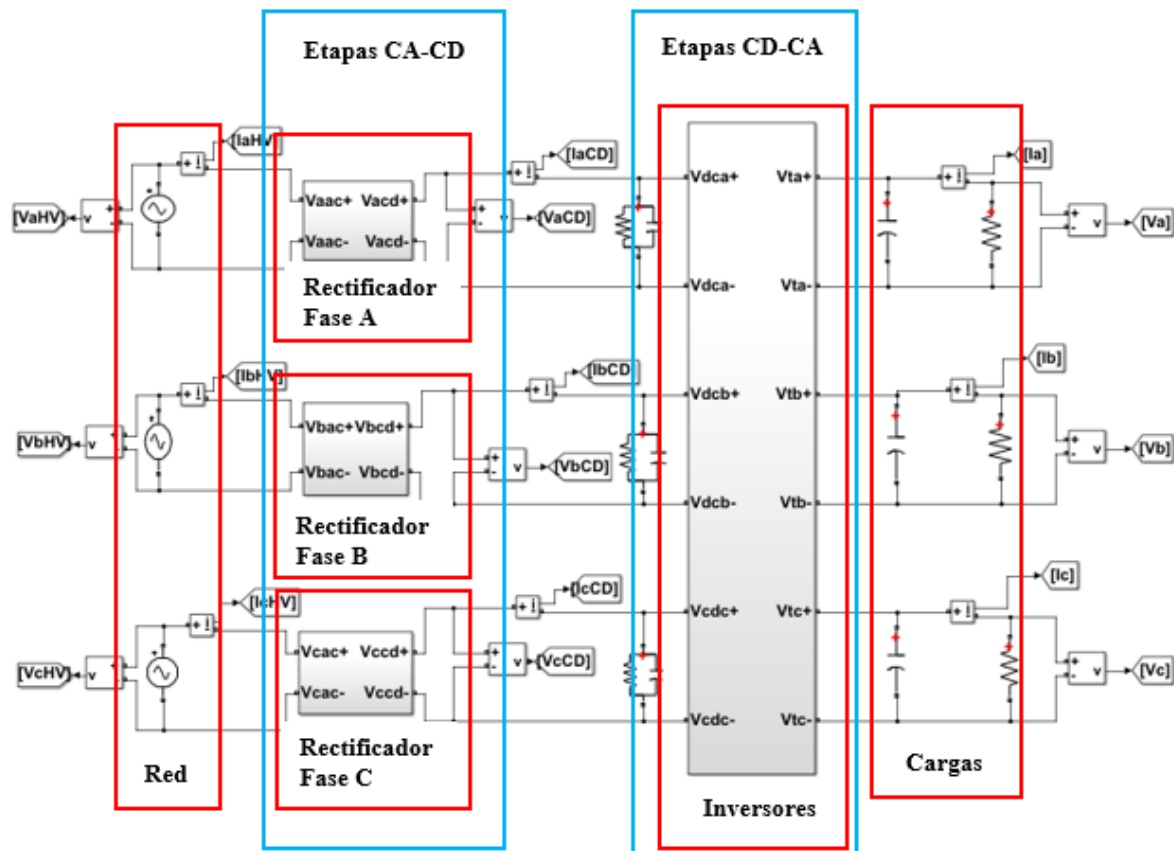


Fig. 4. 2.- Esquemático de simulación de los convertidores en plataforma Matlab/Simulink.

4.3. Casos de estudio

Una vez que se ha expuesto a detalle la propuesta del TDH, así como sus respectivas etapas, nombres y características, es importante validar su desempeño a través de simulaciones, donde estas estarán basadas en siete casos de estudios básicos. Los casos de estudio a analizar son los siguientes:

- Caso 1. Balance continuo de potencias en el primario.
- Caso 2. Corrección del factor de potencia.
- Caso 3. Regulación de tensión en el secundario.
- Caso 4. Inmunidad ante la pérdida de una fase.
- Caso 5. Inyección de reactivos a la red.
- Caso 6. Flujo de potencia bidireccional.
- Caso 7. Múltiples escenarios.

A fin de analizar a detalle cada uno de los casos expuestos, para los seis primeros casos de estudio se mostrarán dos gráficas referentes a los comportamientos externos e internos en el TDH respecto a las variables más representativas de operación, específicamente cada gráfica mostrará los siguientes datos:

Gráfica 1.- Voltaje y corriente de entrada y salida V_K vs I_K y V_k vs I_k .

Gráfica 2.- Potencias de entrada en corriente alterna P_K , potencias de salida P_k y voltajes de corriente directa V_{DCK} .

Para el caso número siete se mostrarán tres gráficas, y serán de la siguiente forma:

Gráfica 1.- Voltaje y corriente de entrada y salida V_K vs I_K y V_k vs I_k .

Gráfica 2.- Potencias de entrada en corriente alterna P_K , potencias de salida P_k y voltajes de corriente directa V_{DCK} .

Gráfica 3.- Potencias de corriente directa, índices de las moduladoras de los rectificadores (m_A , m_B y m_C) y de los inversores (m_{a1} , m_{b1} y m_{c1})

Finalmente, un análisis cualitativo de cada una de las respuestas obtenidas es expuesto al final de cada caso de estudio.

4.3.1. Balance continuo de potencias en el primario

Se sabe que los desbalances de cargas trifásicas son las principales causas para que se presente circulación de corriente por el conductor neutro de un sistema de distribución y

se presenten componentes de corriente de secuencia negativa, lo cual en casos extremos, dichas corrientes pueden tomar valores tan significativos que incluso superan la corriente que circula por alguna de las fases, provocando la activación innecesaria de los sistemas de protecciones, interpretando señales de cortocircuito y reduciendo así los niveles de confiabilidad.

Considerando lo anterior, esta simulación se realiza con el objetivo de demostrar que el TDH diseñado tiene la capacidad de mantener un balance de potencias de entrada igual a la potencia promedio suministrada a la salida, de la forma: $P_A = P_B = P_C = \frac{1}{3}(P_a + P_b + P_c)$. Con lo que, se obtienen los siguientes beneficios: *i*) reducción de pérdidas por calentamiento, incremento en la confiabilidad y eliminación de dispositivos, ej.: D-STATCOM y *ii*) eliminación de problemáticas en máquinas eléctricas y/o bancos de capacitores debido al desbalance de tensiones provocado por los desbalances de carga.

Secuencia de cambios. - A fin de demostrar la acción de balanceo de cargas hecha por el transformador diseñado TDH, se realiza una serie de combinaciones diferentes en la potencia activa demandada por la carga (P_a , P_b y P_c), bajo la siguiente secuencia de cambios:

$$P_a = \begin{cases} 5kW & 0.0 < t < 2.5 \\ 20kW & 2.5 < t < 4 \end{cases}$$
$$P_b = \begin{cases} 5kW & 0.0 < t < 2.5 \\ 15kW & 2.5 < t < 4 \end{cases}$$
$$P_c = \begin{cases} 25kW & 0.0 < t < 4 \end{cases}$$

La Fig. 4.3, muestra las formas de onda de voltaje (líneas azules) y corriente (líneas rojas) de cada fase de entrada y salida del TDH, con la cual es posible corroborar por medio de las magnitudes de corrientes de salida (I_a , I_b e I_c) la secuencia de cambios de potencias establecida, pero por otra parte, se observa que las corrientes de entrada en el primario (I_A , I_B e I_C) son equivalentes entre sí todo el tiempo de simulación, en otras palabras crecen y decrecen, en relación a las variaciones en la carga, pero siempre equivalentes entre sí, demostrando así el efecto de balanceo de cargas, cumpliendo así con el comportamiento descrito por la ecuación (3.47), donde además dicho efecto se corrobora con las gráficas siguientes.

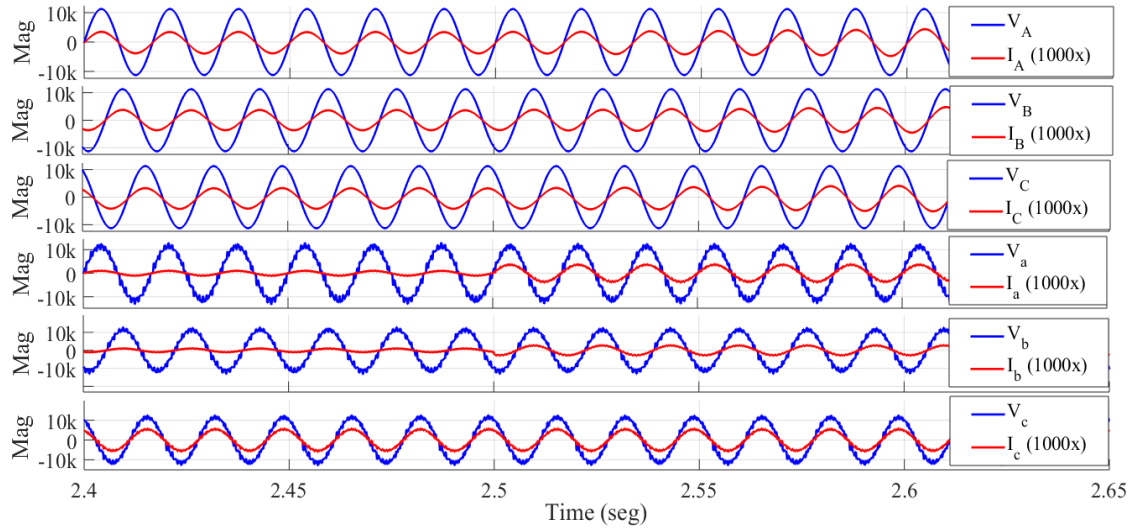


Fig. 4. 3.- Voltajes vs corrientes por fase de entrada salida para caso 1.

La Fig. 4.4, muestra las dinámicas referentes a las potencias internas generadas en el TDH, específicamente puede observarse el efecto de los distintos suministros de potencia a la salida en el secundario (P_a , P_b y P_c) promediadas en 60Hz, mientras que se observa que las potencias de entrada (P_A , P_B y P_C), mantienen valores equivalentes entre si todo el tiempo igual al promedio de las tres potencias de salida y tienen un tiempo de restablecimiento de aproximadamente 1s.

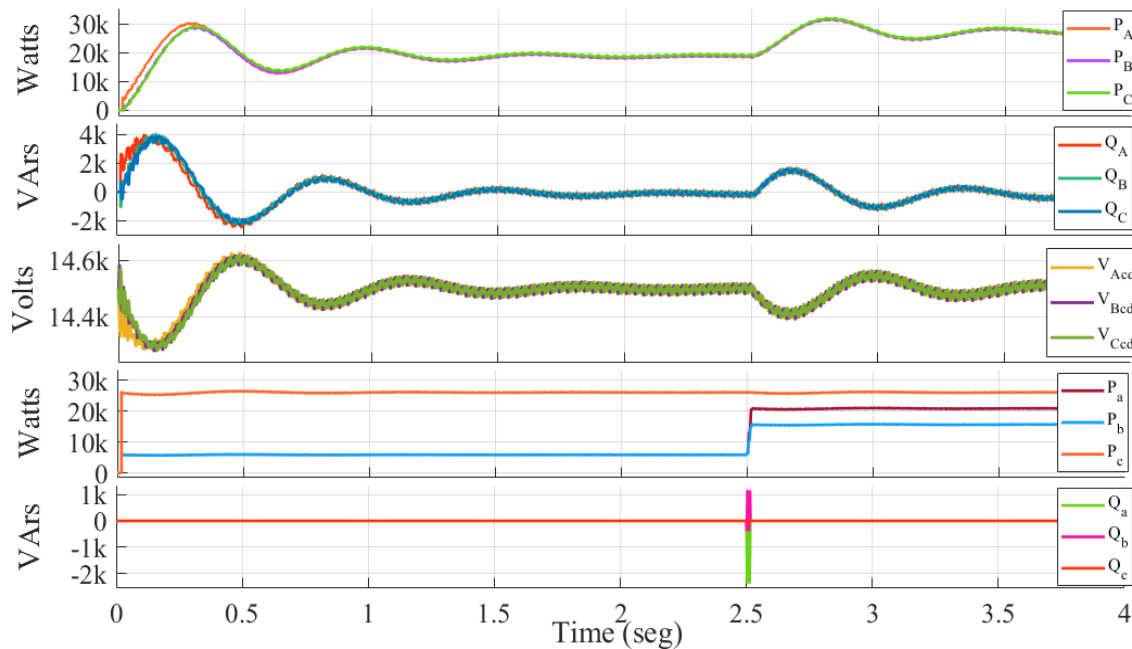


Fig. 4. 4.- Potencias de entrada y salida en CA y potencias internas en CD para caso 1.

Sustentado en las dinámicas y formas de onda mostradas, unido a las variables internas del TDH, es posible corroborar que se cumple exitosamente con el balanceo continuo de potencias en el devanado primario del transformador. Esto se debe a la estructura de fases cruzadas explicada en la sección 3.6.3, mediante la ecuación (3.47), ante los distintos desbalances generados en el secundario, obteniendo así ventajas significativas a las redes de distribución y a los usuarios finales.

4.3.2. Corrección del factor de potencia

La circulación de corriente reactiva en redes de distribución produce una serie de efectos negativos y contrarios al ahorro y a la eficiencia energética. La mejora del factor de potencia se realiza tradicionalmente con la implementación de bancos de condensadores o a través de dispositivos basados en convertidores de electrónica de potencia, por ejemplo, los D-STATCOMS, tanto en instalaciones industriales por parte del consumidor o en las redes eléctricas de distribución por la compañía suministradora.

En esta simulación se pretende demostrar que el transformador diseñado tiene la capacidad de mantener un factor de potencia unitario, independientemente de los niveles de potencia reactiva generados por las cargas conectadas en el devanado secundario del transformador.

Secuencia de cambios. - A fin de poder demostrar la acción de mantener un factor de potencia unitario en la entrada del TDH diseñado, se contempló una carga por fase de 25kVAr con FP de 0.8 en atraso.

La Fig. 4.5 muestra las formas de onda de voltaje y corriente de cada fase de entrada y salida del TDH, con la cual es posible corroborar por medio de los cambios en magnitud y fase de las corrientes de salida en el secundario (I_a , I_b e I_c) respecto a los voltajes de salida (V_a , V_b y V_c), la secuencia de potencias reactivas generadas, mientras que por otra parte, las corrientes de entrada en el primario (I_A , I_B e I_C) se mantienen equivalentes entre sí, y se conservan sin generar ningún desplazamiento de fase respecto a sus respectivas tensiones V_A , V_B y V_C .

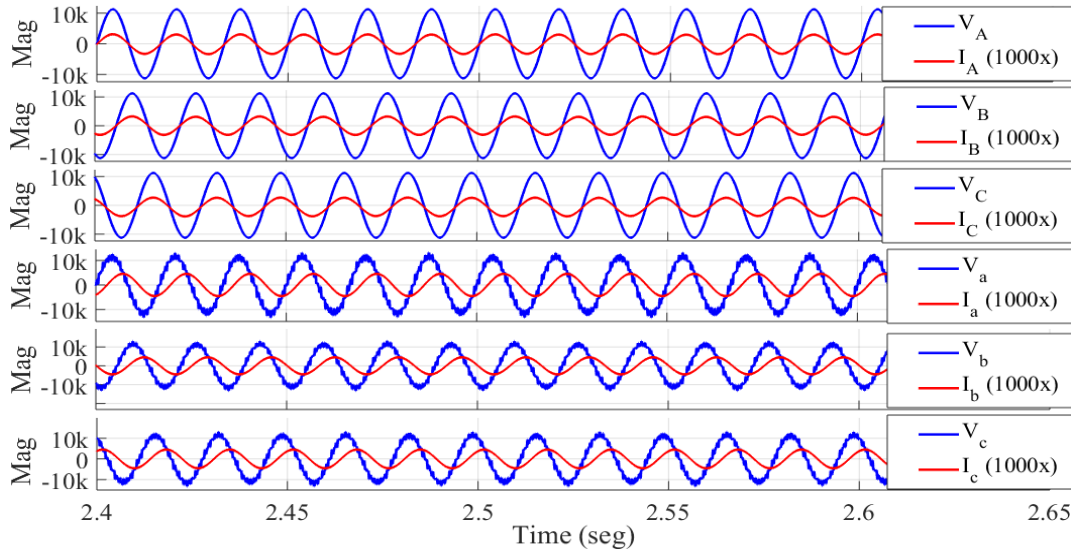


Fig. 4. 5.- Voltajes vs corrientes por fase de entrada salida para caso 2.

A fin de corroborar lo mencionado con anterioridad, la Fig. 4.6 muestra las mismas respuestas dinámicas respecto a la Fig. 4.5, pero ahora representando las potencias de CA promediadas en 60Hz. En esta, los cambios de potencia reactiva generados en el devanado secundario (Q_a, Q_b, Q_c) no se manifiestan en el devanado primario, siendo $Q_A = Q_B = Q_C = 0$, con excepción del periodo de los transitorios.

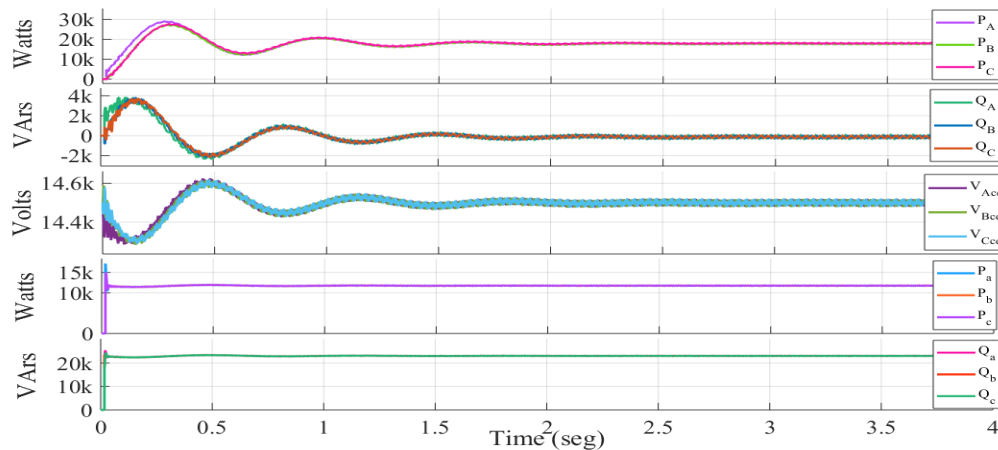


Fig. 4. 6.- Potencias de entrada y salida en CA y potencias internas en CD para caso 2.

Con base en las dinámicas y formas de onda mostradas, en conjunto con las principales variables internas del TDH propuesto, es posible corroborar que se cumple exitosamente la corrección del factor de potencia en el devanado primario del TDH, ante las distintas potencias reactivas generadas en el lado de la carga, obteniendo así ventajas

significativas económicas y de operación a las redes de distribución como a los usuarios finales, debido a la eliminación de dispositivos de compensación de potencia reactiva y/o eliminación de multas hacia los usuarios por parte de la empresa suministradora.

En la sección 4.3.7 se muestra la simulación de un caso múltiple, donde se realiza una secuencia de cambios para diferentes factores de potencia en las cargas.

4.3.3. Regulación de tensión en las cargas

Los *sags* de tensión son el principal problema de calidad de la energía en redes de distribución, proteger las cargas sensibles industriales es una necesidad primordial en procesos de manufactura, debido a las pérdidas económicas que implican.

Esta simulación se realiza con el objetivo de comprobar que el TDH tiene la capacidad de mantener una regulación continua de tensión de CA en el lado de la carga ante un cierto margen de caídas o *sags* de tensión en el primario.

Secuencia de cambios.- A fin de poder demostrar la acción de mantener una regulación continua de tensión en el devanado secundario del TDH, se realiza una serie de disturbios de voltaje en cada una de las fases de entrada, específicamente *sags* del 30% en las tensiones V_A , V_B y V_C , abarcando así *sags* monofásicos ($0.75 < t < 0.9$), *sags* en dos fases ($0.9 < t < 1.0$) y *sags* trifásicos ($1.0 < t < 1.25$), bajo la siguiente secuencia de cambios:

$$V_A = \begin{cases} 11.26 \text{ kV}_{\text{pico}} & 0.0 < t < 0.9 \\ 7.88 \text{ kV}_{\text{pico}} & 0.9 < t < 2.5 \\ 11.26 \text{ kV}_{\text{pico}} & 2.5 < t < 4 \end{cases}$$
$$V_B = \begin{cases} 11.26 \text{ kV}_{\text{pico}} & 0.0 < t < 0.75 \\ 7.88 \text{ kV}_{\text{pico}} & 0.75 < t < 1.25 \\ 11.26 \text{ kV}_{\text{pico}} & 1.25 < t < 4 \end{cases}$$
$$V_C = \begin{cases} 11.26 \text{ kV}_{\text{pico}} & 0.0 < t < 1.0 \\ 7.88 \text{ kV}_{\text{pico}} & 1.0 < t < 1.5 \\ 11.26 \text{ kV}_{\text{pico}} & 1.5 < t < 4 \end{cases}$$
$$P_a = P_b = P_c = 25 \text{ kW}$$
$$Q_a = Q_b = Q_c = 0 \text{ kW}$$

Como se observa en la Fig. 4.7 las tensiones de entrada (V_A , V_B y V_C) generan condiciones transitorias de *sags* de tensión del 30%, iniciando con V_A , seguido de V_B y hasta operar en un estado de *sag* trifásico, mostrando así que las corrientes de fase de entrada (I_A , I_B

e I_C), generan incrementos de magnitud transitoria y en estado estable, lo cual es atribuible a la acción de control, a fin de conservar la misma potencia de entrada a través de la relación $P_K = V_K * I_K$, en donde la corriente I_K tiende a aumentar debido a la reducción de tensión en V_K , conservando un factor de potencia unitario.

Por otra parte, se observa que las condiciones transitorias de *sags* generadas en V_K , no son perceptibles en las tensiones de CA de salida (V_a , V_b y V_c), generando así, condiciones de regulación constante de tensión a la salida, independientes a los disturbios de tensión generados en la entrada.

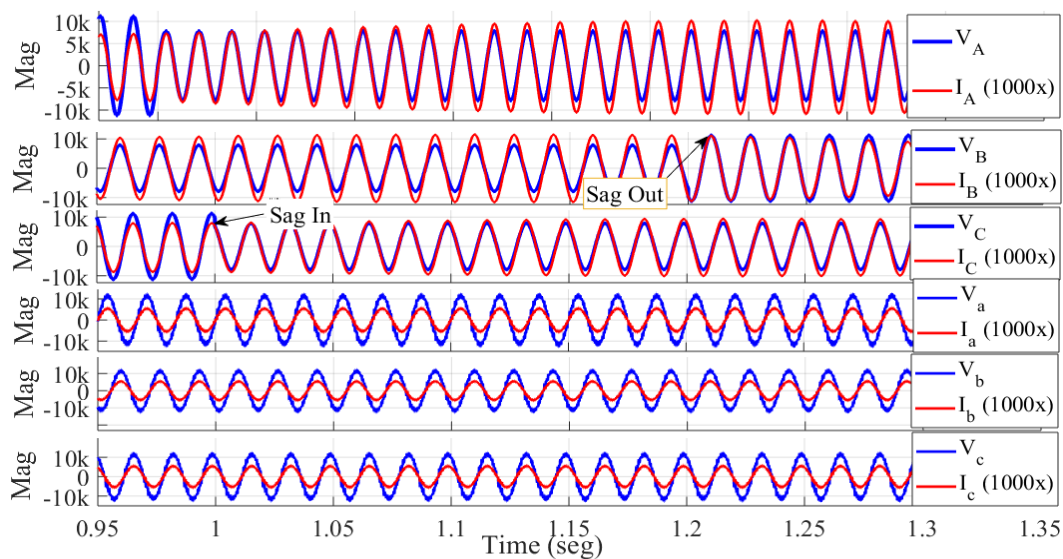


Fig. 4. 7.- Voltajes vs corrientes por fase de entrada salida para caso 3.

La Fig. 4.8, muestra las distintas potencias de entrada, internas y de salida del TDH, como puede observarse, las potencias activas y reactivas de salida no muestran ningún cambio significativo durante el proceso de simulación siendo $P_a = P_b = P_c = 25kW$ y $Q_a = Q_b = Q_c = 0.0kVAr$ s.

Por otra parte, las potencias de entrada si muestran cambios dinámicos, referentes a la generación de sus respectivos *sags* en cada voltaje de fase de entrada, dicho efecto transitorio se considera normal, debido a los reajustes de corriente (I_A , I_B e I_C) y voltaje de CD (V_{DCA} , V_{DCB} y V_{DCC}), generados a partir de las estrategias de control.

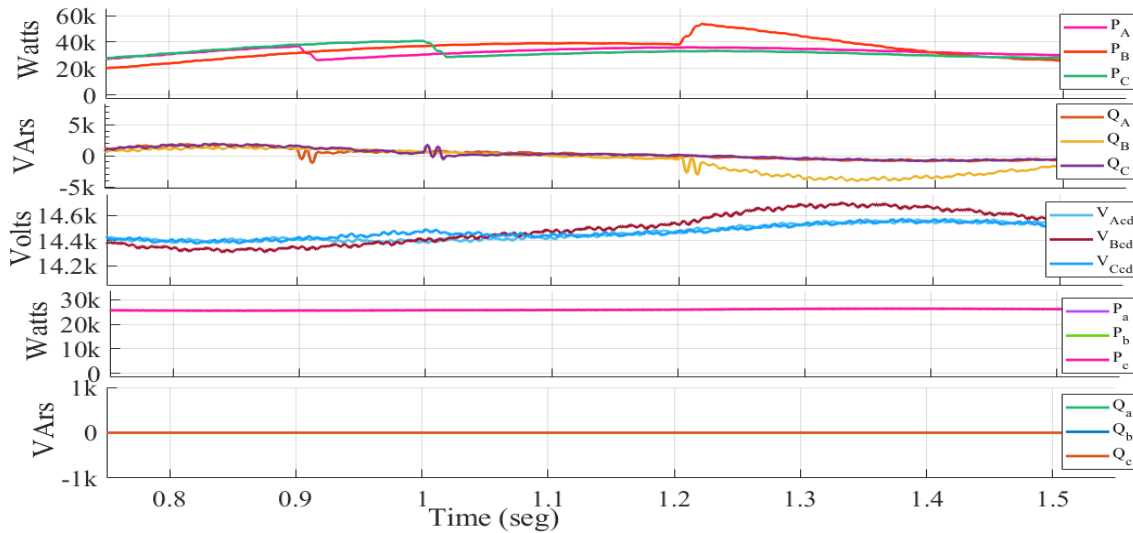


Fig. 4. 8.- Potencias de entrada y salida en CA y potencias internas en CD para caso 3.

Con base en las dinámicas y formas de onda mostradas, en conjunto con las principales variables internas del TDH, es posible corroborar que se cumple exitosamente la regulación de voltajes a la salida, independientemente de las distintas combinaciones de disturbios de voltajes generados a la entrada.

Pero se alcanza a ver que, durante los tiempos transitorios, se forma potencia reactiva, e incluso el voltaje de CD tiene desviaciones de aproximadamente del 10%, lo cual se puede solucionar con controles más óptimos en trabajos futuros.

4.3.4. Inmunidad ante la pérdida de una fase

Esta simulación, tiene como objetivo demostrar que el transformador diseñado tiene la capacidad de mantener una tensión de CA ante la pérdida de una o dos fases de tensión de entrada a fin de garantizar el suministro eléctrico ante cortes de energía ajenas al usuario, siempre y cuando la sumatoria de potencia de salida sea menor a 50kW al perder una fase o 25kW al perder dos fases.

Secuencia de cambios. - A fin de poder demostrar la acción de mantener una continua regulación de tensión en el devanado secundario del TDH, se realiza una serie de *sags* y cortes de energía en cada una de las fases de entrada V_A , V_B y V_C , abarcando así combinaciones de cortes de energía en una y dos fases así, como estados de cortes de energía y *sags* de tensión, bajo la siguiente secuencia de cambios:

$$V_A = \{ 11.26 \text{ kV}_{\text{pico}} \quad 0.0 < t < 4$$

$$V_B = \begin{cases} 11.26 \text{ kV}_{\text{pico}} & 0.0 < t < 1.5 \\ 0.01 \text{ kV}_{\text{pico}} & 1.5 < t < 1.75 \\ 11.26 \text{ kV}_{\text{pico}} & 1.75 < t < 4 \end{cases}$$

$$V_C = \{ 11.26 \text{ kV}_{\text{pico}} \quad 0.0 < t < 4$$

$$P_a = P_b = P_c = 12.5 \text{ kW}$$

Como es posible apreciar en la Fig. 4.9, a lo largo de la simulación expuesta, las corrientes de fase de entrada (I_A , I_B e I_C), generan incrementos de magnitud, transitoria y en estado estable, lo cual es atribuible a la acción de control, donde, es válido mencionar que las fases complementarias a los cortes de energía, son capaces de suministrar la potencia necesaria para el suministro de potencia de las tres fases de salida.

Demostrando así, que las condiciones transitorias de cortes de energía en combinación con *sags* de tensión generadas en V_K , no son perceptibles en las tensiones de CA, (V_a , V_b y V_c), generando así, condiciones de regulación constante de los voltajes a la salida, independientes a los disturbios de tensión generados en la entrada, siempre y cuando la sumatoria de potencia de salida sea menor a 50kW al perder una fase o 25kW al perder dos fases.

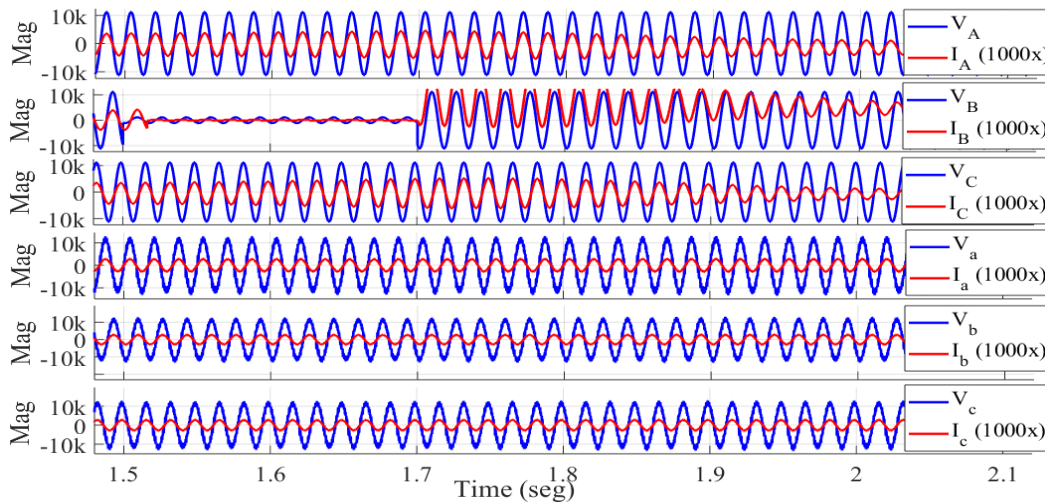


Fig. 4. 9.- Voltajes vs corrientes por fase de entrada salida para caso 4.

La Fig. 4.10 muestra las distintas potencias de entrada, internas y de salida del TDH, en este caso de estudio las potencias de entrada muestran los cambios dinámicos más significativos de todos los casos de estudio analizados hasta el momento, mostrando estados

de cero potencia activa P_K tiempo después de los respectivos cortes de energía y estados de potencia activa mayores a 30kW por fase (solo por un determinado tiempo, ya que se estarían excediendo los límites de potencia del transformador, pero sin llegar al punto de quemarse), cabe mencionar que aunque dicho efecto transitorio se considera normal, debido a los reacomodos de corriente (I_A , I_B e I_C) y voltaje de CD (V_{DCA} , V_{DCB} y V_{DCC}), es importante profundizar en una estrategia de control robusto para este caso de estudio, pues es necesario amortiguar los transitorios de potencia activa, con el fin de proteger los dispositivos semiconductores de entrada.

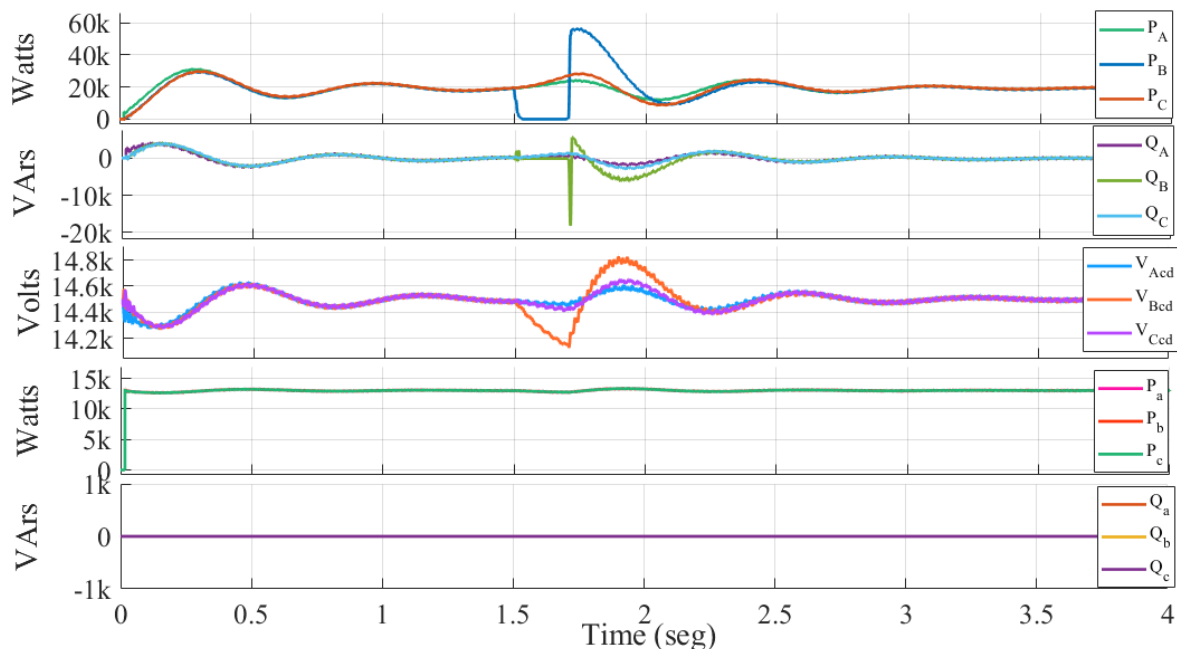


Fig. 4. 10.- Potencias de entrada y salida en CA y potencias internas en CD para caso 4.

En base a las dinámicas y formas de onda mostradas en conjunto de las principales variables internas del TDH propuesto, es posible corroborar que se cumple exitosamente la regulación de voltajes a la salida, independientemente de los cortes de energía en una fase.

Cabe mencionar que este caso de estudio se considera un aporte significativo derivado de este trabajo de tesis, ya que, en el estado del arte, no se ha encontrado ninguna referencia de un transformador híbrido o electrónico con la capacidad de inmunidad ante la pérdida de una fase.

4.3.5. Inyección de reactivos a la red (Compensación de VARs)

Debido al comportamiento inductivo de las líneas eléctricas de distribución en conjunto con las cargas eléctricas industriales y residenciales, así como las impedancias de los distintos transformadores, tienden a generar un continuo desbalance de potencias activas y reactivas en una red de distribución.

Con este caso de estudio se quiere demostrar que el transformador diseñado tiene la capacidad de realizar la compensación de potencia reactiva a fin mejorar el factor de potencia en diferentes nodos de la red o mejorar los perfiles de voltaje a través de la inyección o absorción de reactivos, realizando así funciones de los dispositivos D-FACTs aplicados en redes de distribución.

Secuencia de cambios.- A fin de demostrar la acción de inyección o absorción de potencia reactiva a la red de distribución, sin afectar las condiciones de tensión en el devanado primario del TDH (independientemente de las cargas conectadas en el secundario), se realizan una serie de cambios en forma capacitiva e inductiva en las potencias reactivas de entrada (Q_A , Q_B y Q_C), bajo el escenario de máxima potencia activa de salida por fase ($P_a = P_b = P_c = 25 \text{ kW}$) con base a la siguiente secuencia de cambios:

$$Q_A = \begin{cases} 0.0 \text{ kVARs} & 0.0 < t < 2 \\ 15 \text{ kVARs} & 2 < t < 4 \end{cases}$$
$$Q_B = \begin{cases} 0.0 \text{ kVARs} & 0.0 < t < 2 \\ -22 \text{ kVARs} & 2 < t < 4 \end{cases}$$
$$Q_C = 0.0 \text{ kVARs}$$
$$P_a = P_b = P_c = 25 \text{ kW}$$
$$Q_a = Q_b = Q_c = 0 \text{ kW}$$

La Fig. 4.11 muestra las formas de onda de voltaje y de corriente de los devanados primarios y secundarios del TDH, de las cuales puede apreciarse un estado inicial de V_A e I_A en fase, seguido de un retraso de fase de -30.9° de la corriente I_A , respecto a la tensión V_A en el tiempo $t = 2\text{s}$. De forma paralela se observa de un adelanto de fase de 41.34° en $t = 2\text{s}$, de la corriente I_B , respecto a la tensión V_B hasta el final del tiempo de simulación. La corriente I_C , no presentan ningún desplazamiento de fase a lo largo de la simulación.

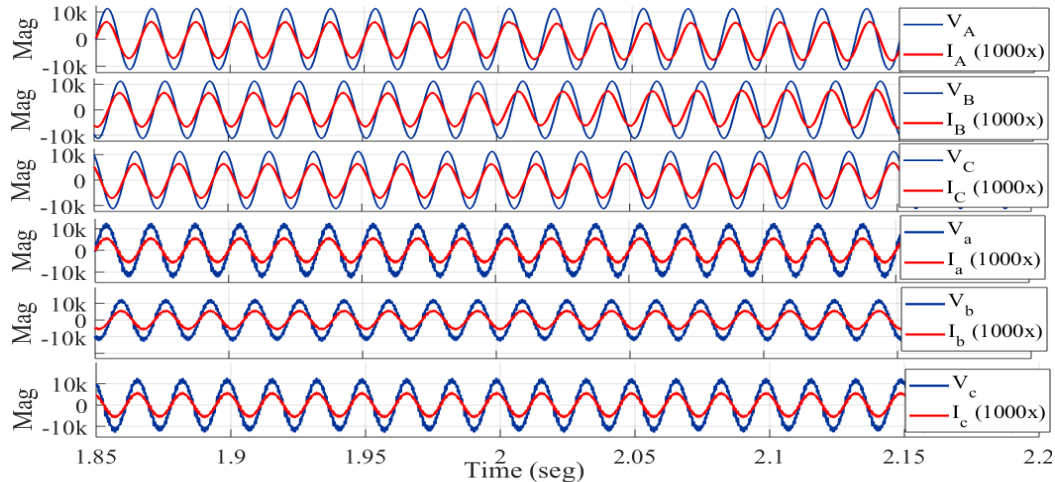


Fig. 4. 11.- Voltajes vs corrientes por fase de entrada salida para caso 5.

La Fig. 4.12 muestra las dinámicas de potencias activas y reactivas de CA en ambos puertos del TDH, así como los voltajes de CD internos.

Como puede apreciarse las potencias activas de entrada (P_A , P_B y P_C) muestran una magnitud constante, mientras que las potencias reactivas (Q_A , Q_B y Q_C), representan fielmente la secuencia de cambios establecida mostrando adicionalmente pequeñas oscilaciones en todas las potencias de entrada, las cuales son atribuibles al cambio de referencia de corrientes efectuado por la acción de control.

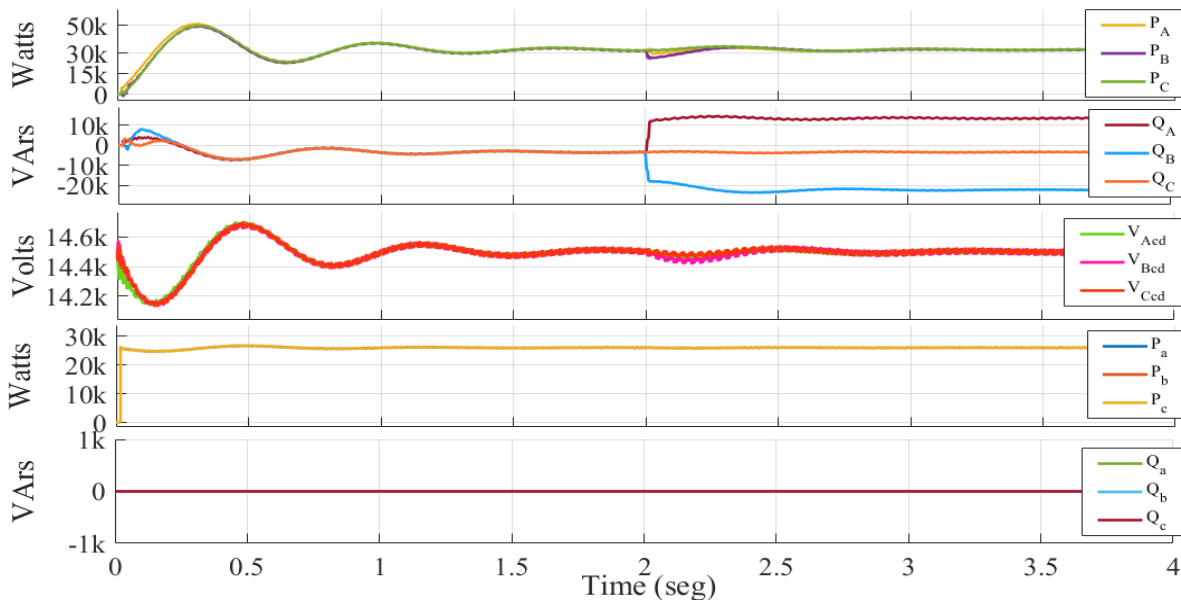


Fig. 4. 12.- Potencias de entrada y salida en CA y potencias internas en CD para caso 5.

Con base en las dinámicas y formas de onda mostradas, en conjunto de las principales variables internas del TDH expuesto, es posible corroborar que se cumple con la generación

de potencia reactiva en el devanado primario, con lo cual, se deduce que dicho dispositivo es capaz de hacer un intercambio de reactivos con la red, generando así beneficios significativos, además de poder realizar las funciones de los dispositivos D-FACTS, así como la función de dispositivos análogos conectados a la red de distribución, como bancos de condensadores o reactores en derivación, a fin de mantener los niveles de potencia reactiva deseados o perfiles de tensión.

4.3.6. Flujo de potencia bidireccional (Integración de Energías Renovables)

La generación distribuida es una cooperación entre la micro-generación y la generación de las centrales convencionales, esta distribución hace que la generación sea más equilibrada, y que los usuarios finales no dependan tanto de las grandes centrales.

En este escenario, es sabido que la cantidad de energía generada por el usuario en base a fuentes de energías renovables, es muy variable en el tiempo, ya sea durante el día o estacional, y dependiente de factores climáticos.

El fin de esta simulación constituye demostrar que el transformador diseñado tiene la capacidad de absorber potencia activa en los devanados secundarios, debido a la interconexión de fuentes de energía renovable residencial o de baja potencia (menores a 25kW), contribuyendo a los esquemas modernos de generación distribuida e intercambio energético entre los usuarios consumidores y empresas de suministro.

Secuencia de cambios.- A fin de demostrar la acción de intercambio bidireccional de potencia activa entre el usuario consumidor y la empresa suministradora de energía a través del TDH, una serie de cambios positivos y negativos en las potencias activas de salida (P_a , P_b y P_c) son realizados, con lo cual es posible demostrar la capacidad de flujo de potencia bidireccional en el transformador diseñado y/o la capacidad de interconexión de fuentes de energía renovable a nivel residencial, todo esto bajo la siguiente secuencia de cambios:

$$P_a = \begin{cases} 12.5 \text{ kW} & 0.0 < t < 1.5 \\ -12.5 \text{ kW} & 1.5 < t < 4 \end{cases}$$
$$P_b = \begin{cases} 12.5 \text{ kW} & 0.0 < t < 1.5 \\ -12.5 \text{ kW} & 1.5 < t < 4 \end{cases}$$
$$P_c = \begin{cases} 12.5 \text{ kW} & 0.0 < t < 1.5 \\ -8.5 \text{ kW} & 1.5 < t < 4 \end{cases}$$

La Fig. 4.13 muestra las formas de onda de tensión y corriente por fase de los devanados primarios y secundarios del TDH, de manera específica se expone un comportamiento estable en el tiempo $t < 1.6 s$, para posteriormente pasar a un estado de inyección de potencia activa de 20kW al TDH, a través de la corriente I_a , de la cual, se observa un intercambio de fase de 180° y un ligero incremento en magnitud.

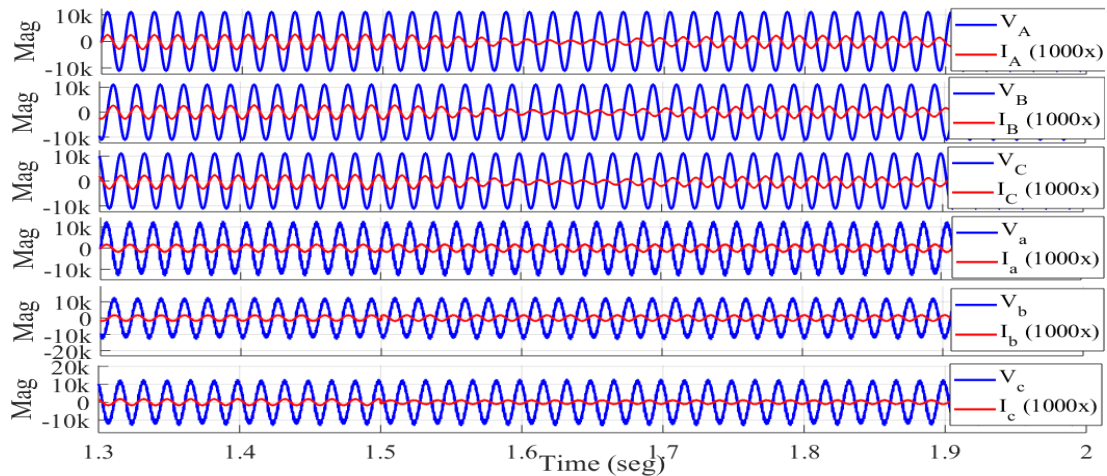


Fig. 4. 13.- Voltajes vs corrientes por fase de entrada salida para caso 6.

Ante dichos cambios es posible observar que la magnitud y fase de voltaje de salida no presenta ningún cambio, mientras que la corriente, presenta una inversión de flujo después de 1.5 segundos, emulando la interconexión de una fuente renovable. Lo cual ocasiona que, a la entrada, las corrientes, tienden a reducirse equivalentemente, hasta lograr un flujo bidireccional a los 1.75 segundos de simulación, esto debido a los tiempos de respuestas de los controles.

La Fig. 4.14 muestra las dinámicas de potencia referentes al caso de estudio 6, como se observa, las potencias activas de salida (P_a , P_b y P_c), representan fielmente la secuencia de cambios establecida, donde debido a la penetración de energía renovable, se invierte el flujo de potencia.

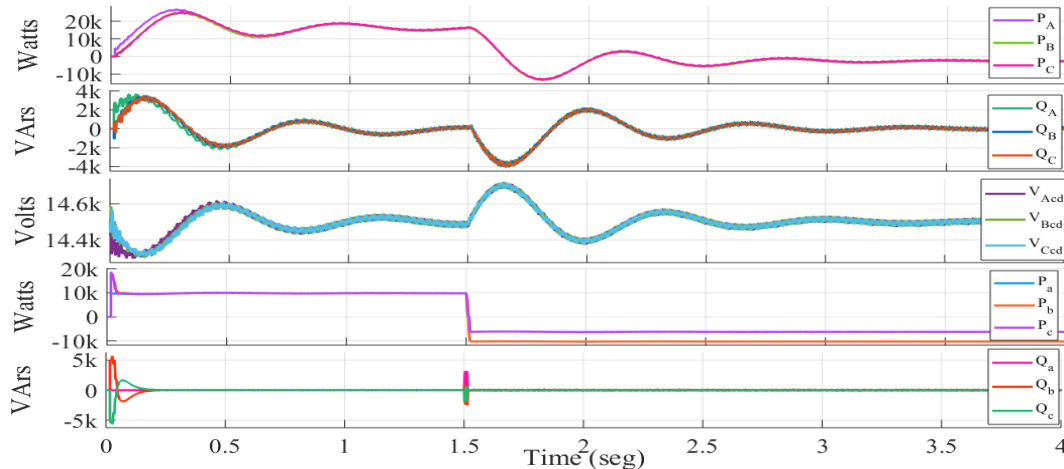


Fig. 4. 14.- Potencias de entrada y salida en CA y potencias internas en CD para caso 6.

Finalmente, se observa que las potencias activas de entrada (P_A , P_B y P_C), tienen siempre un comportamiento equivalente, igual al promedio de la sumatoria de corrientes de salida.

En el escenario de sistemas eléctricos modernos como lo es la generación distribuida, la energía excedente generada por los usuarios en base a fuentes de energías renovables residenciales, es inyectada a la red eléctrica a fin de realizar un intercambio o despacho energético, para lo cual, transformadores de nueva generación deberán contar con características bidireccionales.

El transformador diseñado muestra la capacidad de flujo de potencia bidireccional e interconexión de fuentes de energía renovables, cumpliendo así con las expectativas futuras de las redes eléctricas.

4.3.7. Múltiples escenarios

Luego de realizar un análisis del TDH bajo diferentes escenarios de operación por separado, se decidió simular el TDH bajo varias condiciones simultáneas, para poder observar su funcionamiento y una vez más corroborar la flexibilidad que presenta este transformador.

Secuencia de cambios. - Para este caso de estudio se contemplaron tres escenarios diferentes de operación:

- 1- A fin de demostrar la acción de balanceo de cargas hecha por el transformador diseñado TDH se realizan una serie de combinaciones diferentes en el suministro de potencia activa y reactiva de salida (P_a , P_b y P_c) y (Q_a , Q_b y Q_c), bajo la siguiente secuencia de cambios:

$$P_a = \{ 25kW \quad 0.0 < t < 4$$

$$Q_a = \{ 25kVAr \quad 0.0 < t < 4$$

$$P_b = \begin{cases} 5kW & 0.0 < t < 1.6 \\ 2.5kW & 1.6 < t < 4 \end{cases}$$

$$Q_b = \{ 0kVAr \quad 0.0 < t < 4$$

$$P_c = \begin{cases} 25kW & 0.0 < t < 1.4 \\ 12.5kW & 1.4 < t < 4 \end{cases}$$

$$Q_c = \begin{cases} 25kVAr & 0.0 < t < 1.4 \\ 12.5kVAr & 1.4 < t < 4 \end{cases}$$

- 2- A fin de poder demostrar la acción de mantener un factor de potencia unitario en la entrada del TDH diseñado, se contempló una carga conectada en las fases a y b 25kVAr con FP de 0.8 en atraso.
- 3- A fin de poder demostrar la acción de mantener una continua regulación de tensión en el devanado secundario del TDH, se realizan una serie de disturbios de voltaje en cada una de las fases de entrada, específicamente *sags* del 30% en las tensiones V_A , V_B y V_C abarcando así *sags* monofásicos ($0.75 < t < 0.9$), *sags* en dos fases ($0.9 < t < 1.25$) y *sags* trifásicos ($1.0 < t < 1.25$), bajo la siguiente secuencia de cambios:

$$V_A = \begin{cases} 11.26 kV_{pico} & 0.0 < t < 0.9 \\ 7.88 kV_{pico} & 0.9 < t < 1.75 \\ 11.26 kV_{pico} & 1.75 < t < 4 \end{cases}$$

$$V_B = \begin{cases} 11.26 kV_{pico} & 0.0 < t < 0.75 \\ 7.88 kV_{pico} & 0.75 < t < 1.25 \\ 11.26 kV_{pico} & 1.25 < t < 4 \end{cases}$$

$$V_C = \begin{cases} 11.26 kV_{pico} & 0.0 < t < 1.0 \\ 7.88 kV_{pico} & 1.0 < t < 1.5 \\ 11.26 kV_{pico} & 1.5 < t < 4 \end{cases}$$

La Fig. 4.15, muestra las formas de onda de voltaje (líneas azules) y corriente (líneas rojas) de cada fase de entrada y salida del TDH, con la cual es posible corroborar por medio de las magnitudes de corrientes de salida en el secundario (I_a , I_b e I_c) la secuencia de cambios de potencias establecida, pero por otra parte, se observa que las corrientes de entrada en el primario (I_A , I_B e I_C) son equivalentes entre sí todo el tiempo de simulación, demostrando así el efecto de balanceo de cargas, además es posible corroborar por medio de los cambios en magnitud y fase de las corrientes de salida en el secundario (I_a , I_b e I_c) respecto a los voltajes de salida (V_a , V_b y V_c), la secuencia de potencias reactivas generadas, mientras que por otra parte, las corrientes de entrada en el primario (I_A , I_B e I_C) se mantienen equivalentes entre sí, y se conservan sin generar ningún desplazamiento de fase respecto a sus respectivas tensiones V_A , V_B y V_C y por último se puede observar cómo las tensiones de entrada (V_A , V_B y V_C) generan condiciones transitorias de *sags* de tensión del 30%, iniciando con V_B , seguido de V_A y hasta operar en un estado de *sag* trifásico, mostrando así que las corrientes de fase de entrada (I_A , I_B e I_C), generan incrementos de magnitud transitoria y en estado estable, lo cual es atribuible a la acción de control, a fin de conservar la misma potencia de entrada a través de la relación $P_K = V_K * I_K$, en donde la corriente I_K tiende a aumentar debido a la reducción de tensión en V_K , conservando un factor de potencia unitario, demostrando su capacidad de regulación de tensión en el secundario.

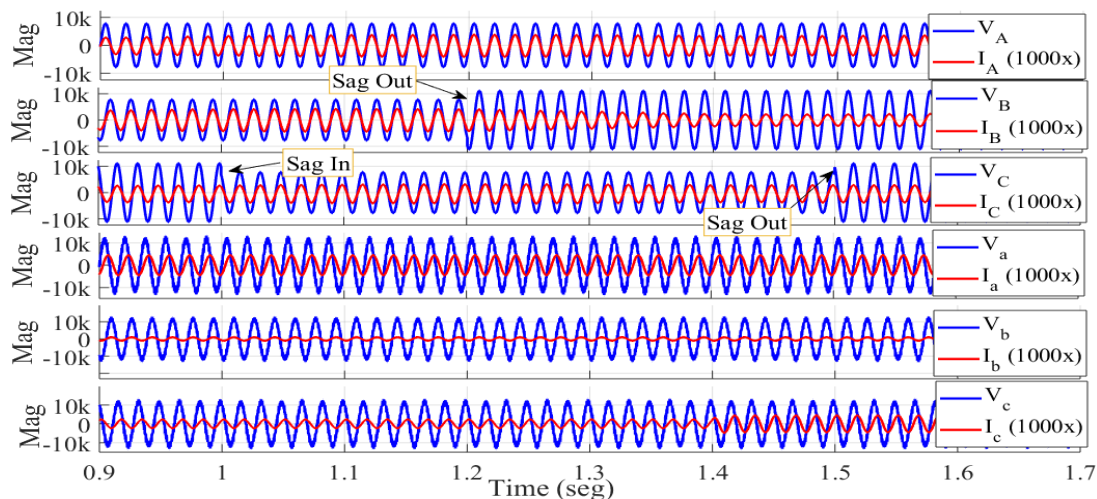


Fig. 4. 15.- Voltajes vs corrientes por fase de entrada salida para caso 7.

La Fig. 4.16, muestra las dinámicas referentes a las potencias internas generadas en el TDH, específicamente puede observarse el efecto de los distintos suministros de potencia

a la salida en el secundario (P_a , P_b y P_c) promediadas en 60Hz, mientras que se observa que las potencias de entrada (P_A , P_B y P_C), mantienen valores equivalentes entre si todo el tiempo igual al promedio de las tres potencias de salida y tienen un tiempo de restablecimiento de aproximadamente 2s.

Con el fin de corroborar lo mencionado con anterioridad, la Fig. 4.16 muestra las mismas respuestas dinámicas respecto a la Fig. 4.15 pero ahora representando las potencias de CA promediadas en 60Hz donde los cambios de potencia reactiva generados en el devanado secundario (Q_a , Q_b y Q_c), no se ven manifestados en el devanado primario, siendo $Q_A = Q_B = Q_C = 0$, pasado los 2s de simulación aproximadamente. Además, se puede observar cómo las potencias activas y reactivas de salida no muestran ningún cambio significativo durante el proceso de simulación. Por otra parte, las potencias de entrada si muestran cambios dinámicos, referentes a la generación de sus respectivos *sags* de voltaje en cada fase de entrada, dicho efecto transitorio se considera normal, debido a los reacomos de corriente (I_A , I_B e I_C) y voltaje de CD (V_{DCA} , V_{DCB} y V_{DCC}), generados a partir de las estrategias de control.

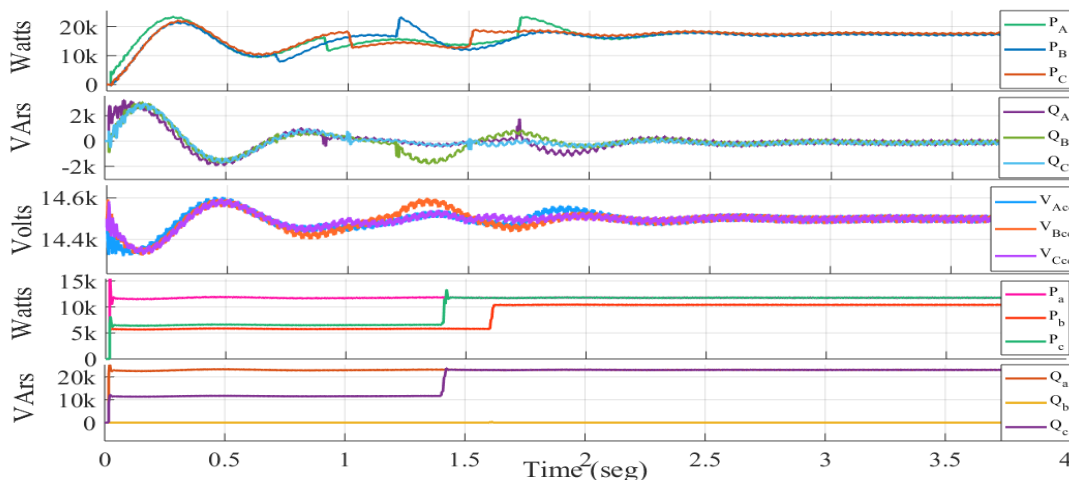


Fig. 4. 16.- Potencias de entrada y salida en CA y potencias internas en CD para caso 7.

La Fig. 4.17 muestra las dinámicas correspondientes a las potencias internas de CD del TDH y de las variables moduladoras del rectificador y del inversor, se puede ver como las moduladoras del rectificador cambian de valor según entra cada cambio de condición de operación del transformador, preferiblemente en el intervalo de 0.9 – 1.2s, siempre

manteniendo uno de magnitud como máximo valor y por último se observa como las variables moduladoras del inversor mantienen su valor en uno y están desfasadas entre sí.

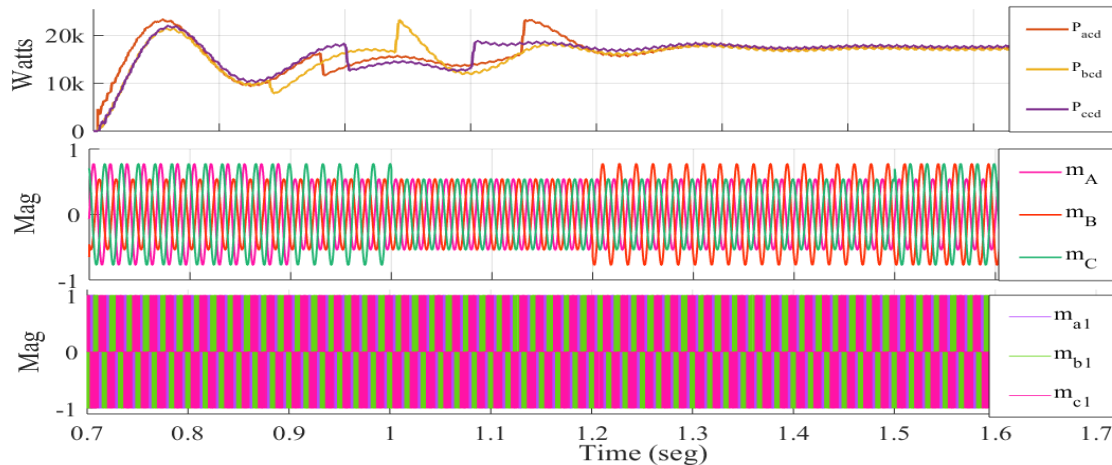


Fig. 4. 17.- Potencias internas de CD y moduladoras de rectificadores e inversores para caso 7.

Mediante este caso de estudio es posible corroborar todo lo visto anteriormente, pero en esta ocasión combinando diferentes condiciones, el TDH se sigue comportando como una estructura capaz de resolver muchos problemas existentes en las redes eléctricas actuales y demuestra potencial para las redes futuras.

Una vez más es posible comprobar que se cumple exitosamente el balanceo de cargas continuo en el devanado primario del transformador, que cumple la corrección del factor de potencia en el devanado primario del TDH ante las distintas potencias reactivas generadas en el devanado secundario y que cumple la regulación de voltajes a la salida, independientemente de las distintas combinaciones de disturbios de voltajes generados a la entrada.

4.4. Conclusiones particulares

- Una desventaja determinada en las simulaciones lo constituye, que los tiempos de respuesta aún son lentos, para mejorar esto, es necesario implementar mejores controles, por ejemplo, el amortiguamiento activo.
- La generación de distorsión armónica a la entrada del TDH, siempre fue menor que el cinco por ciento.

Capítulo V: Experimento

5.1. Introducción

En este capítulo se describe el proceso de construcción del prototipo a escala del Transformador de Distribución Híbrido desarrollado en este trabajo de tesis, mostrando el aspecto de sus principales componentes, mediante una imagen en 3D del PCB diseñado, así como del prototipo final. En este capítulo se sometió el dispositivo construido a una operación homóloga a la del TDH analizado en simulación, se realizaron tres casos de estudios entre ellos cambios de carga, variaciones de voltaje y corrección del factor de potencia. Las formas de onda obtenidas del prototipo en sus diferentes modos de operación son mostradas en este capítulo, junto con la evidencia fotográfica correspondiente.

5.2. Descripción y armado del prototipo

La estructura fundamental del Transformador de Distribución Híbrido, consta de nueve convertidores en puente H conectados en paralelo mediante el método de fases cruzadas, como se vio en los capítulos anteriores, donde cada uno de ellos está compuesto por cuatro transistores de potencia.

La PCB utilizada se diseñó utilizando el software Proteus, en la Fig. 5.1 se muestra el proceso de diseño, se puede ver en a) el routing de las pistas y en b) el esquemático en 3D del puente H, implementado en los convertidores utilizados en este trabajo de tesis.

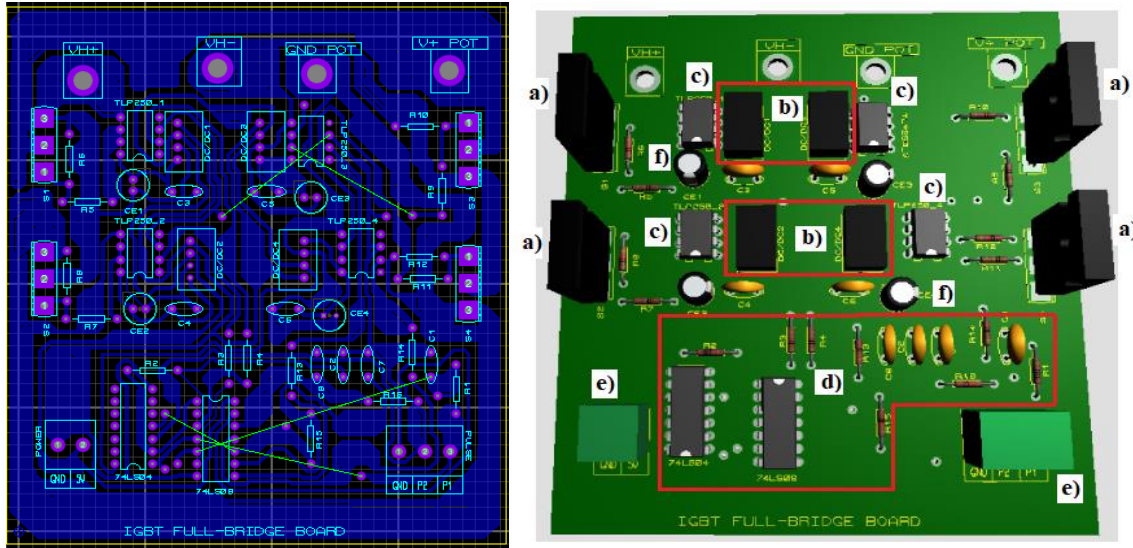


Fig. 5. 1.- Diseño del esquemático del PCB del puente H, a-) Routing del PCB del puente H, b-) PCB en 3D puente H.

La Fig. 5.2 muestra la estructura del transformador híbrido propuesto en este trabajo de tesis y en la tabla 5.1 se pueden observar las principales características y especificaciones de los componentes utilizados. En apéndice se encuentran las hojas de datos de los componentes a), b) y c).

Tabla 5. 1.- Especificaciones de los principales componentes del puente H.

Componente		Especificaciones	Serie
a)	IGBTs	$V_{CES} = 600V$ $V_{CE(on)} = 1.45V$ $@V_{GE} = 15V, I_C = 39A$	G4PC50FD
b)	Fuentes de DC/DC aisladas	$P_{out}=0.75W$ $V_{in}=4.5V$ to $5.5V$ $V_{out}=12V$	CME0512S3C
c)	Opto-drivers	$I_F=5mA(max.)$ $I_{CC}: 11mA(max.)$ $V_{CC}: 10-35V$ $I_O: \pm 1.5A (max.)$	TLP250
d)	Circuito	$C=0.1\mu F$ y $0.22 \mu F$ $R=10$ ohms y 10 kohms Logic Gates	74LS04 74LS08
e)	Terminales	$10 \times 10 \times 16.8$ mm $10 \times 15 \times 16.8$ mm	TRTG-02 TRTG-03
f)	Capacitores	$100\mu F$ 25V	-----

La Fig. 5.2 a), b) y c) muestran el proceso de ensamblado de los convertidores puente H utilizados y la versión final del prototipo del TDH, respectivamente.

Como se puede observar en la Fig. 5.2 c), están destacadas las principales etapas del prototipo, los sensores de CA colocados a la entrada del voltaje de alimentación, a continuación tenemos los tres convertidores puente H que funcionan como rectificadores, posterior el bus de CD, posición que se encarga de censar los V_{CDK} usados en el control, ya luego se encuentran los nueve convertidores que hacen función de inversores y por último se encuentra el filtro de salida formado por nueve inductancias de 8.5 mH y tres capacitores de 10 μ F. Todos los componentes se fijaron en una tabla de 0.6 m de ancho por 1.20 m de largo. Además, se muestra en la imagen la posición de las dos DSP para controlar el funcionamiento de la parte rectificadora y de la parte inversora.

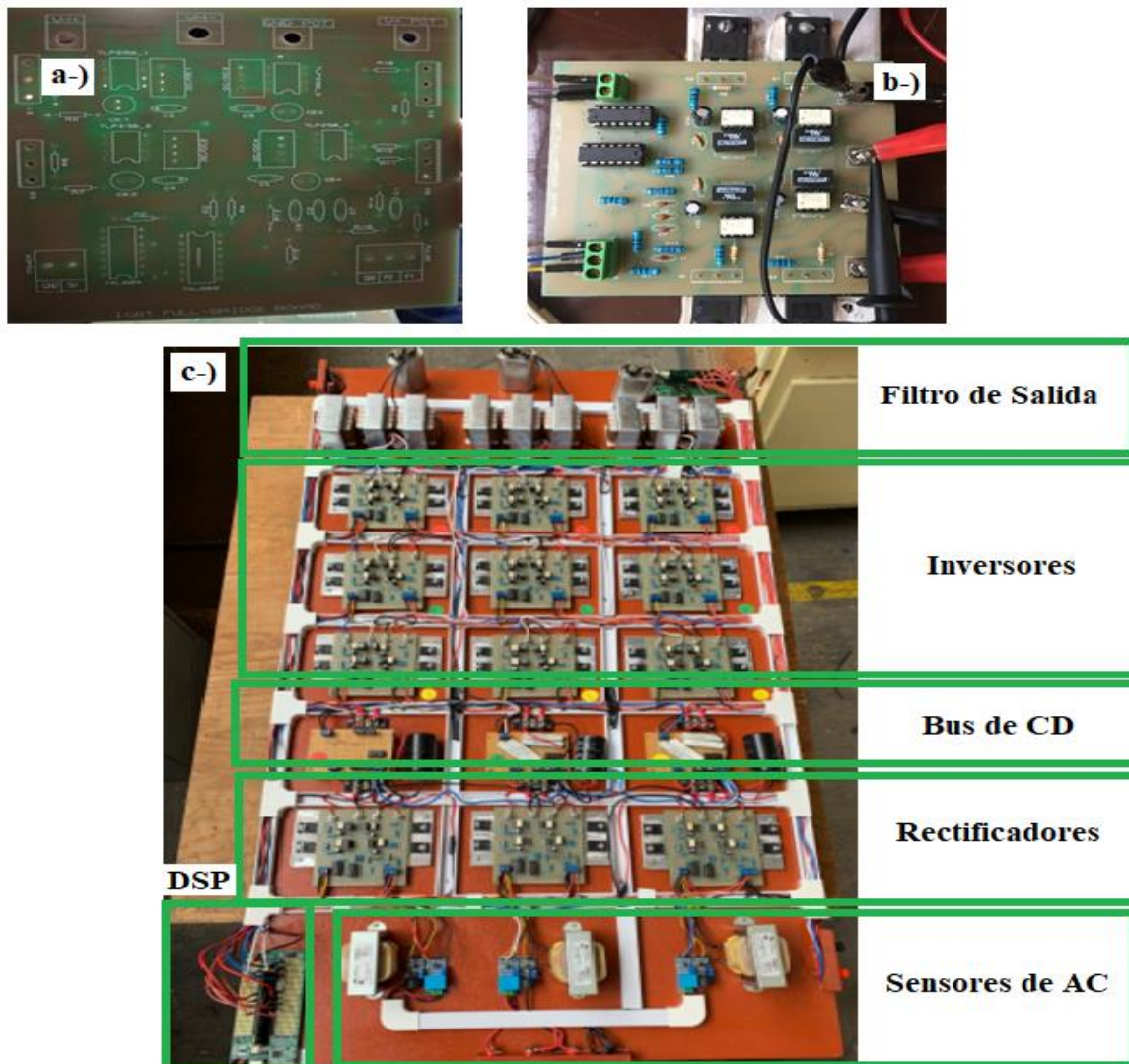


Fig. 5. 2.- Prototipo final del TDH.

5.3. Generación de los pulsos de control

Las señales de control del convertidor fueron entregadas por las terminales GPIO del DSP (Digital Signal Processor) TMF320F28335 de Texas Instruments, cuyo aspecto se muestra en la Fig. 5.3 a). Adicionalmente, se utilizaron las entradas ADC (Convertidor de señal analógica a digital) de la tarjeta de desarrollo para efectuar un control de voltaje, esto gracias a tres sensores CD con matrícula ISO - 124P de Texas Instruments, Fig. 5.3 b), que se instalaron en el bus de CD del TDH, estos sensores, miden el voltaje de salida en los terminales de salida de cada rectificador y lo reducen a un rango entre 0 y 3.3 V, que posteriormente es entregado a la entrada ADC, además en la Fig. 5.3 c) se muestran los sensores de CA de voltaje y corriente utilizados en el prototipo.

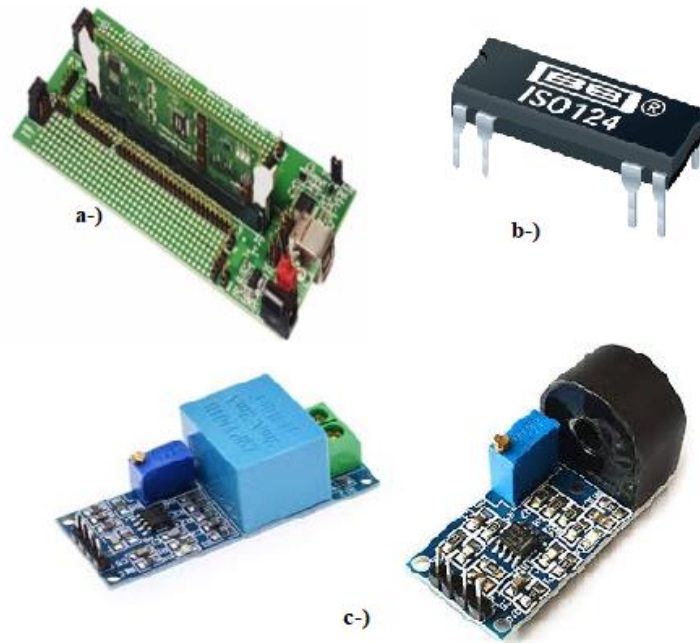


Fig. 5. 3.- Accesorios de Texas Instruments utilizados en el TDH.

5.3.1. Entorno en Matlab/Simulink

Para generar los pulsos de control en el microcontrolador, es necesario hacer uso de la plataforma Simulink del software especializado Matlab, que establece una manera de programar a la tarjeta de desarrollo por medio de diagramas de bloques sencillos. Para este prototipo, se hicieron uso de dos diagramas de bloques diferentes, uno para la etapa inversora y otro para la etapa rectificadora.

El diagrama de bloques correspondiente a la etapa inversora, se muestra en la Fig. 5.4, donde el primer paso para la generación de los pulsos de control es producir tres señales triangulares, donde estas se encuentran desfasadas por 120° entre ellas, luego se comparan con una onda senoidal de amplitud menor a la triangular obtenida, cada puente H de esta etapa necesita dos pulsos de control. Encerrado en un rectángulo rojo se muestran los pulsos positivos y en el recuadro azul se encuentran los pulsos complementarios.

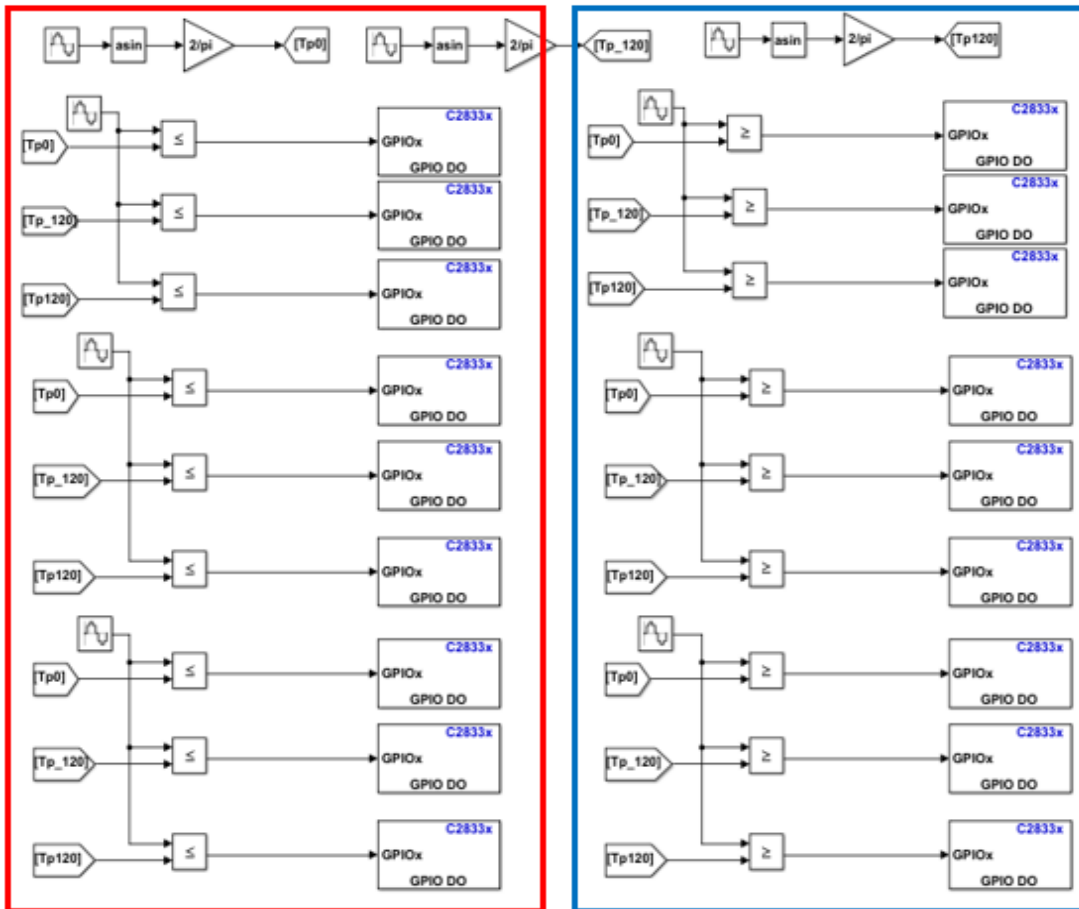


Fig. 5. 4.- Diagrama de bloques para generación de pulsos de control etapa inversora.

En la Fig. 5.5 se pueden observar las formas de onda de las moduladoras. En la Fig. 5.5 a) se muestran las tres formas de onda correspondientes a los inversores a1, a2 y a3 y la senoidal aproximada correspondiente a a1, es fácil ver que las tres se encuentran en fase y como la forma de onda correspondiente a a1 corresponde a la senoidal utilizada.

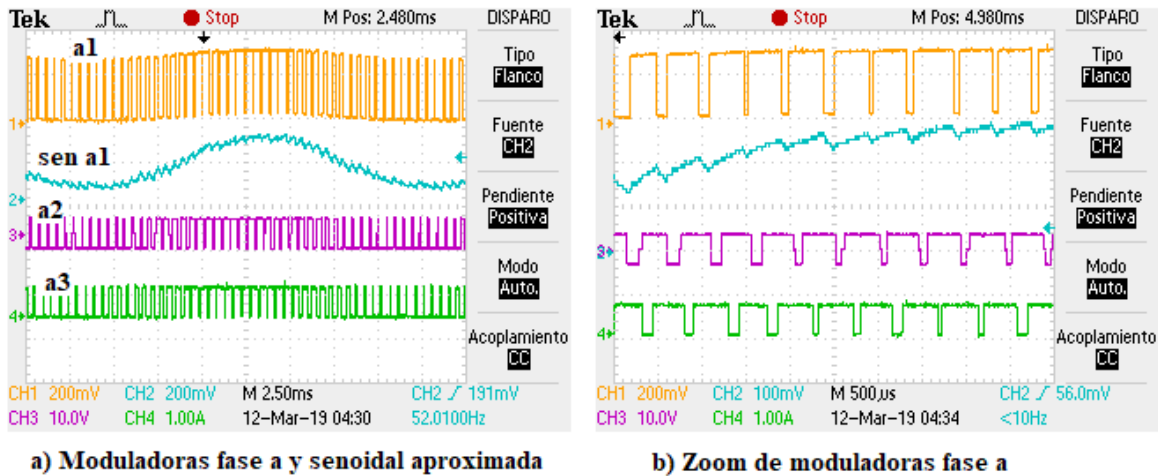


Fig. 5. 5.- Formas de onda moduladoras etapa inversora I.

En la Fig. 5.6 se pueden observar las formas de onda de las moduladoras. En la Fig. 5.6 a) se muestran las tres formas de onda correspondientes a los inversores a1, b1 y c1 y la senoidal aproximada correspondiente a a1, es fácil ver que las tres se encuentran en desfase de 120° y como la forma correspondiente a a1 corresponde a la senoidal utilizada.

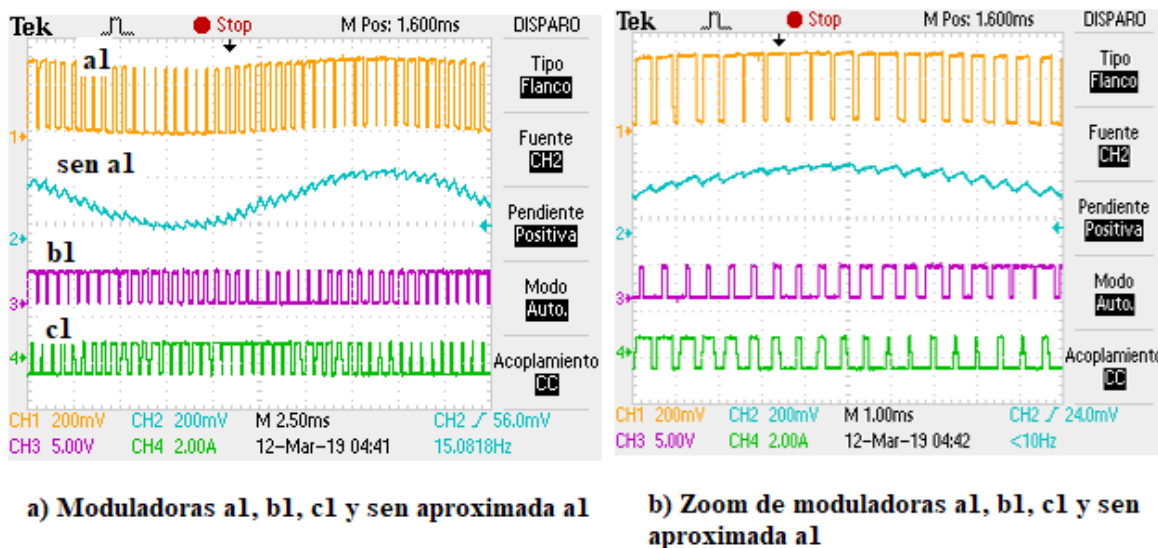


Fig. 5. 6.- Formas de onda moduladoras etapa inversora II.

El diagrama de bloques correspondiente a la etapa rectificadora se muestra en la Fig. 5.7, donde el primer paso para la generación de los pulsos de control es captar las señales provenientes de los sensores de voltaje de CD y el Arduino de CA, mediante el bloque ADC, después pasan a través de un filtro para lograr que la onda se comporte lo más senoidal posible, luego estas señales se acondicionan con el objetivo de quitarle el offset, (propio de

los sensores), después estas señales se utilizan para el control de voltaje del rectificador, ya por ultimo en el bloque PWM 1 se adquieren los pulsos de control de esta etapa.

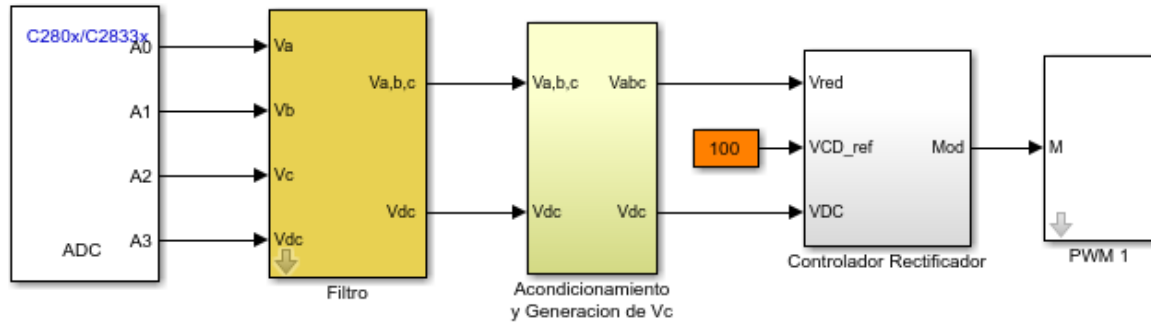


Fig. 5. 7.- Diagrama de bloques para generación de pulsos de control etapa rectificadora.

5.4. Experimento

5.4.1. Etapa inversora

La Fig. 5.8 muestra las formas de onda del voltaje y la corriente de salida correspondientes a la fase **a** del TDH, se puede observar cómo son completamente senoidales y se encuentran en fase. La cuarta curva que se encuentra en color verde muestra la suma ya sea de voltajes o corrientes, aquí se demuestra una de las ventajas del método implementado de fases cruzadas, pues se elimina en buena medida el rizo de la señal, además de que está formada por convertidores que se encuentran en fases diferentes.

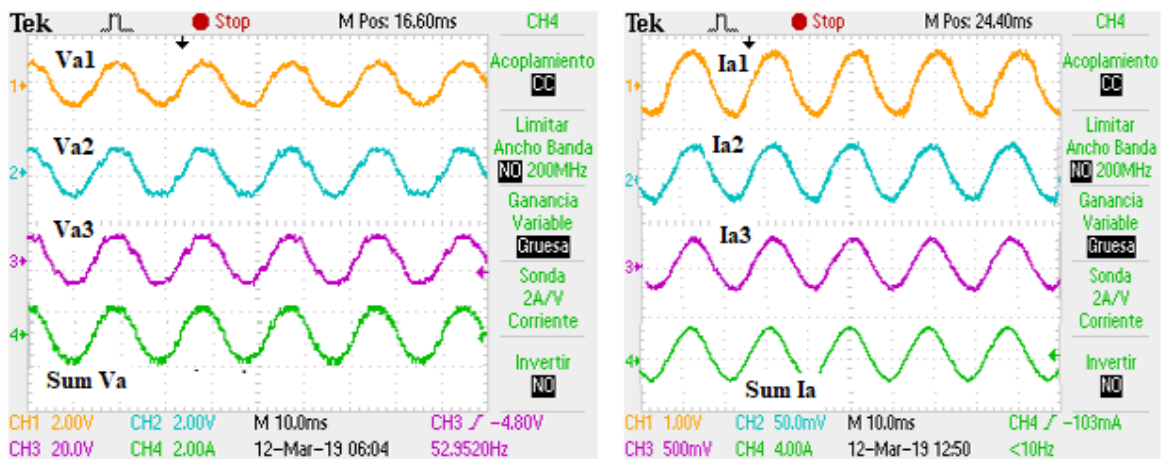
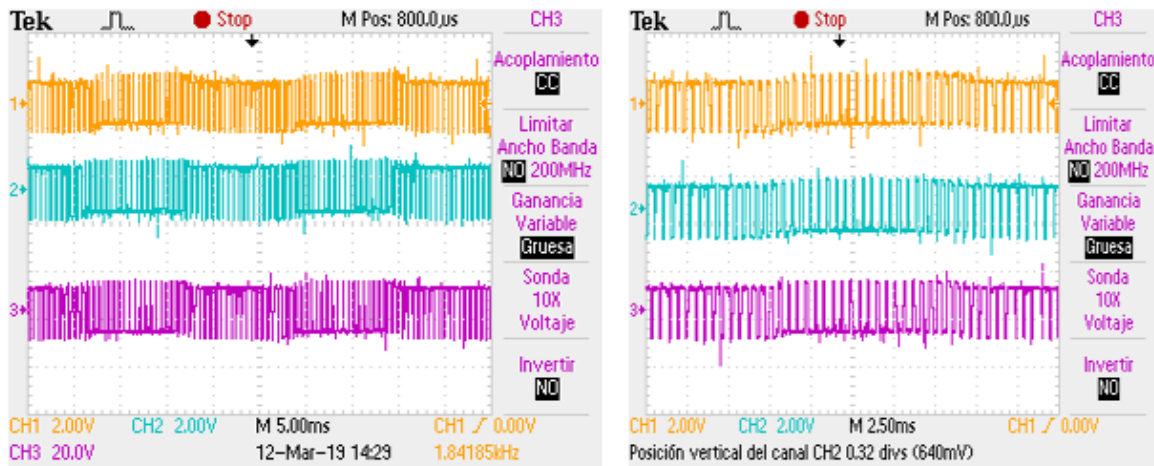


Fig. 5. 8.- Formas de onda de voltaje y corriente a la salida del TDH.

Es válido mencionar, que cuando la onda no es perfectamente senoidal, las mediciones pueden ser erróneas, pero con el uso de un equipo especial, es posible eliminar estas variaciones en las mediciones.

En la Fig. 5.9 a) y b) se puede observar cómo los voltajes en los terminales del puente H correspondientes a la fase a se encuentran en fase.



a) Voltaje terminales puente H fase A

b) Zoom voltaje terminales puente H fase A

Fig. 5. 9.- Formas de onda de voltaje en los terminales del puente H, Vta1, Vta2 y Vta3.

En la Fig. 5.10 a) y b) se puede observar cómo los voltajes en los terminales del puente H correspondientes a los convertidores número 1 de cada fase se encuentran desfasados.

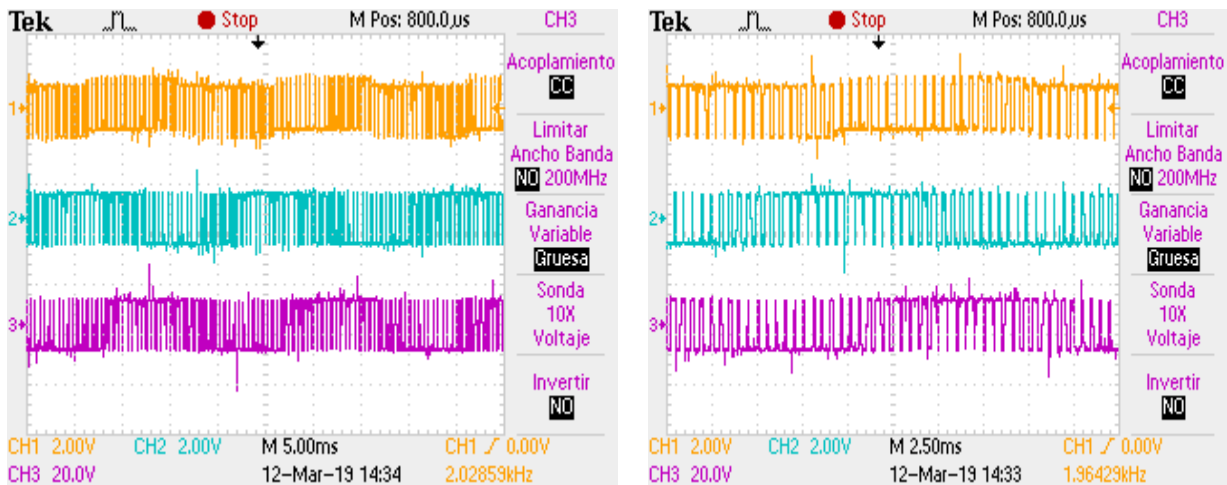


Fig. 5. 10.- Formas de onda de voltaje en los terminales del puente H, Vta1, Vtb1 y Vtc1.

5.4.2. Etapa rectificadora. Casos de estudio.

La Fig. 5.11 muestra el comportamiento de las principales variables en el proceso de conversión de CA/CD, como se observa, se tiene un factor de potencia unitario, las formas de onda de voltaje y corriente se encuentran en fase, además se observa como el voltaje de CD supera el voltaje pico de alimentación.

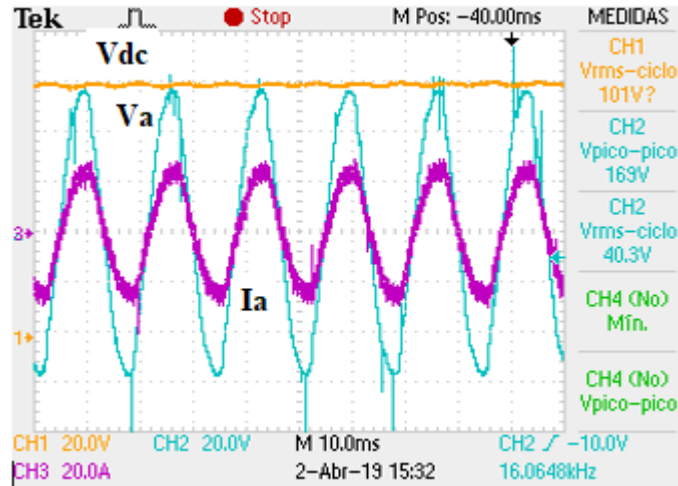


Fig. 5. 11.- Principales variables en estado estable.

5.4.2.1 Escalón de carga

La Fig. 5.12 muestra la respuesta del control ante un cambio de carga, para este caso se disminuyó la resistencia de 100Ω a 45Ω . Durante esta disminución de resistencia la corriente I_a aumenta por lo que la potencia en la salida es mayor, además, según la Fig. 5.12, el voltaje y la corriente se mantienen en fase, además, se puede observar que hay un tiempo de restablecimiento de alrededor de 250ms.

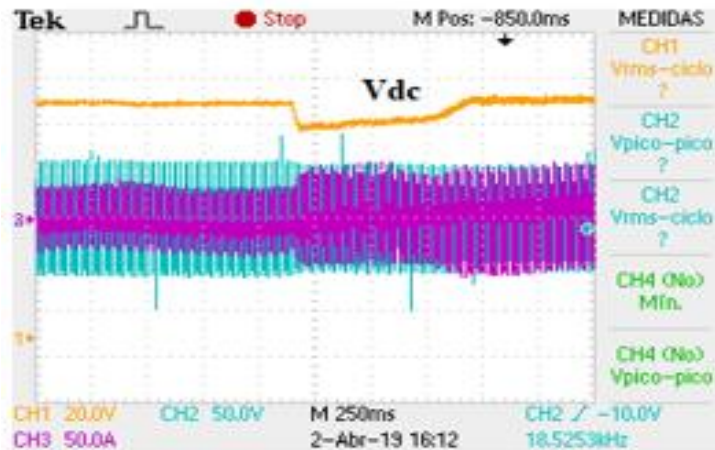


Fig. 5. 12.- Comportamiento ante un escalón de carga.

5.4.2.2 Depresión de voltaje

La Fig. 5.13 muestra el comportamiento del rectificador ante una depresión de voltaje del 30% del voltaje de alimentación, se puede observar que a medida que disminuye el voltaje, aumenta la corriente lo que garantiza que la potencia de entrada sea igual a la potencia de salida, también se observa como el V_{dc} , línea naranja se mantiene en su valor y el factor de potencia se mantiene unitario.

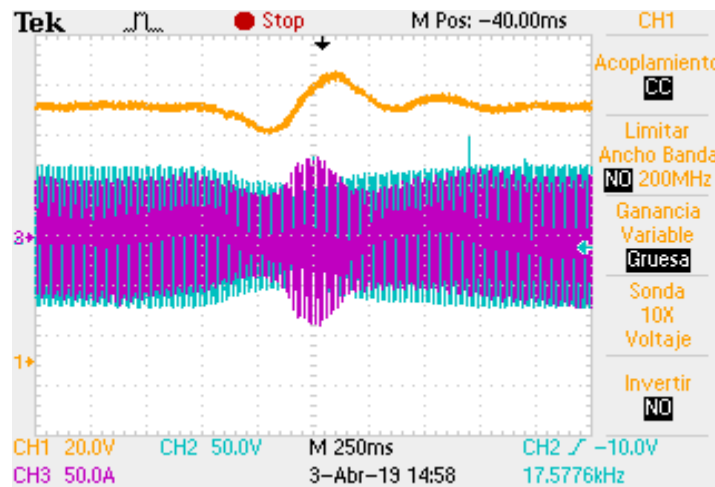


Fig. 5. 13.- Comportamiento ante una depresión de voltaje del 30% del voltaje de entrada.

5.4.2.3 Corrección de factor de potencia

En la Fig. 5.14, a) y b) muestran los casos de estudios para factores de potencia diferentes a uno, llegando a concluir que el control implementado puede manejar diferentes potencias reactivas en la red.

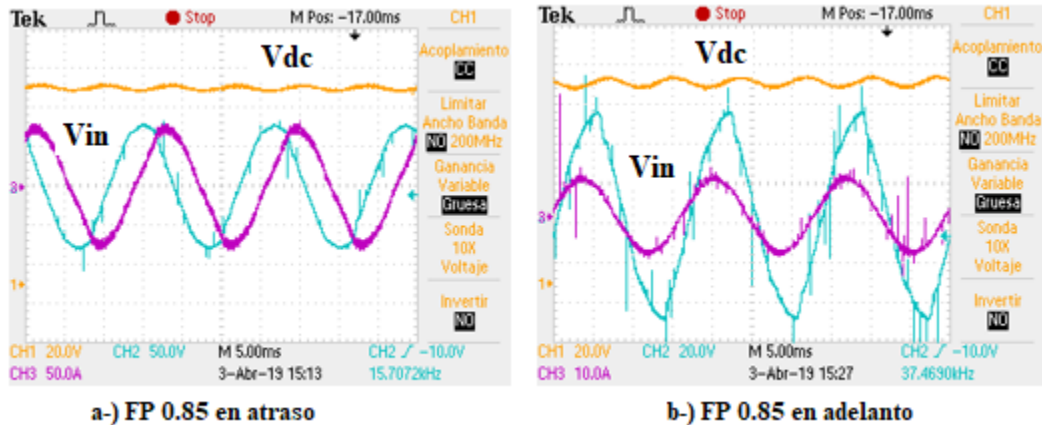


Fig. 5. 14.- Comportamiento ante diferentes factores de potencia.

5.5. Discusión

Finalmente, la conexión total de cada componente desarrollado para el Transformador Híbrido de Distribución propuesto ha mostrado un rendimiento aceptable, es necesario mencionar que para analizar en detalle el comportamiento del TDH en general, se deben tener los instrumentos adecuados para la captura de todas las imágenes en formato digital y herramientas sofisticadas de adquisición de datos para poder monitorear todas las variables del TDH en paralelo y obtener las características de operación en detalle.

Construir el prototipo a escala del TDH, permitió visualizar en un ambiente diferente al de simulación, el comportamiento de las diferentes variables de este transformador, bajo diferentes esquemas de operación, realizando una comparación entre los resultados obtenidos en la simulación con los mostrados en el experimento, donde se puede observar que los resultados se comportan de manera similar.

VER VIDEO DE PROTOTIPO DE LABORATORIO

https://www.dropbox.com/s/o1bd5obj4c53idw/TDH_p%C3%A9rdida_de_una_fase_de_entrada_OK.mp4?dl=0

Capítulo VI: Conclusiones

Este trabajo de tesis se enfocó en el diseño, modelado, simulación y construcción en laboratorio de un Transformador de Distribución Híbrido que pueda resolver los problemas de calidad de la energía que existen hoy en día en las empresas eléctricas de distribución.

Este trabajo presenta las principales ventajas del TDH sobre los transformadores de distribución convencionales, que son: i) reducción de peso y volumen ii) protección a cargas sensibles a eventos de armónicos y variaciones de voltaje, iii) inyección de bajos armónicos a la red; iv) permite la interconexión de múltiples fuentes de alimentación de CA y CD, incluidas las energías renovables.

6.1. Conclusiones

- Se realizó el diseño y modelado del TDH, además, se validaron los resultados obtenidos en la simulación mediante un prototipo de laboratorio, mostrando resultados favorables. Al mismo tiempo, fue posible observar la capacidad que demuestra este transformador, algo que va muy cerca de la literatura, donde se habla que constituye, una de las 10 tecnologías del futuro.
- Despreciando las pérdidas por conmutación, es posible deducir, según se explica en la sección 3.6.3, en la ecuación (3.47), que la potencia de entrada por fase es considerada como una tercera parte de la sumatoria de las tres potencias de salida, Por lo tanto, existe un intercambio de potencia entre las fases de entrada y salida, lo cual genera un continuo balance de potencias a la entrada.
- La presencia de disturbios de tensión en el devanado primario del TDH, no se reflejan en las tensiones del devanado secundario.

- La pérdida de voltaje de una fase en la entrada de alimentación, no genera ninguna pérdida de voltaje en ninguna de las fases de salida.
- El control implementado en la etapa rectificadora es capaz de conservar un factor de potencia unitario y una baja distorsión armónica en la corriente de entrada.
- Las potencias reactivas de entrada (Q_A , Q_B y Q_C), son independientes a las potencias reactivas de salida (Q_a , Q_b y Q_c), dicho en otras palabras, la potencia reactiva generada en la salida del TDH no genera ningún efecto en la potencia reactiva de entrada del TDH, tampoco entre las fases complementarias del mismo.
- En base al sistema de fases cruzadas es posible reducir la frecuencia de conmutación en los convertidores de salida, debido a la reducción de rizo, generada por el traslape en fase de las ondas portadoras, reduciendo así la distorsión armónica de las tensiones de salida.
- La implementación del sistema de fases cruzadas genera ventajas a la eficiencia y reduce las pérdidas de energía en las resistencias parásitas de los elementos de filtrado.

Una vez analizados los puntos anteriores en los casos de estudio expuestos, es posible deducir que el transformador diseñado, tiene el potencial para sustituir diferentes dispositivos externos a la red de distribución, a fin de mejorar su operación, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6. 1.- Funciones del TDH vs aplicaciones cotidianas.

Funciones del TDH	Sustituye la aplicación de:
Balance continuo de potencias en el primario	Técnicas de balanceo de cargas de CFE
Corrección del factor de potencia	Bancos de condensadores del usuario y la empresa
Regulación de tensión en el secundario	Dispositivos reguladores de voltaje externos como: Cambiadores de TAPs o Dispositivos DVRs.
Inmunidad ante la pérdida de una fase	Dispositivos UPS
Compensación de VARs	Bancos de capacitores Dispositivos D-STATCOMs
Flujo de potencia bidireccional (Integración de renovables)	
Filtrado de armónicas	Filtros activos de corriente. Filtros de armónicas analógicos

6.2. Trabajos futuros

Este trabajo de tesis se enfocó en el diseño de un Transformador de Distribución Híbrido que pueda resolver los problemas de calidad que existen hoy en día en las empresas eléctricas de distribución. Los trabajos futuros de esta tesis se pueden enumerar de la siguiente manera:

- Una ventaja de este TDH con respecto a los transformadores electrónicos es que, en caso de una falla en un componente de un convertidor, se puede aislar toda la electrónica de potencia y seguir brindando servicio, por lo que sería ideal estudiar en un futuro el funcionamiento de una protección diferencial en conjunto con un interruptor by pass que garantice este funcionamiento.
- Cálculo de eficiencia y pérdidas del sistema.
- Implementación de mejores controles para amortiguar los transitorios presentes en esta etapa y optimizar los tiempos de respuesta.
- Protecciones adicionales futuras para este dispositivo.
- Obtener modelo de red equivalente para cálculo de corto circuitos en redes de distribución con varios TDH conectados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. De Palacio Rodríguez, “*El Uso De Electrónica De Potencia,*” *Energética XXI*, No. 144, pp. 60–61, 2014.
- [2] J. W. Van Der Merwe and H. Du, “*The solid-state transformer concept: A new era in power distribution,*” *IEEE AFRICON Conf.*, pp. 1–6, 2009.
- [3] M. Liserre, G. Buticchi, M. Andresen, G. De Carne, and L. F. Costa, “*The Smart Transformer,*” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, no. June, pp. 56–67, 2017.
- [4] S. Horowitz, A. Phadke, and B. Renz, “*The Future of Power Transmission,*” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 34–40, 2010.
- [5] M. Kang, P. N. Enjeti, and I. J. Pitel, “*Analysis and design of electronic transformers for electric power distribution system,*” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, no. 6, pp. 1133–1141, 1999.
- [6] L. Cheng, Y. Xie, X. Lu, and Z. Wang, “*The topology analysis and compare of high-frequency power electronic transformer,*” *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, 2012.
- [7] D. Wang, C. Mao, and J. Lu, “*Operation and control mode of electronic power transformer,*” *1st IEEE-PES/IAS Conf. Sustain. Altern. Energy, SAE 2009 - Proc.*, 2009.
- [8] X. She, A. Q. Huang, and R. Burgos, “*Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems,*” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 1, no. 3, pp. 186–198, 2013.
- [9] H. Xin and Z. Buhan, “*The applications of the electronic power transformer in Photovoltaic systems,*” *2011 Int. Conf. Electr. Control Eng. ICECE 2011 - Proc.*, no. 50837003, pp. 3691–3694, 2011.
- [10] D. Wang, C. Mao, J. Lu, S. Fan, and F. Peng, “*Theory and application of distribution electronic power transformer,*” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 3–4, pp. 219–226, 2007.
- [11] X. She, S. Lukic, A. Q. Huang, S. Bhattacharya, and M. Baran, “*Performance evaluation of solid-state transformer based microgrid in FREEDM systems,*” *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 182–188, 2011.

- [12] Y. Du, S. Baek, S. Bhattacharya, and A. Q. Huang, “*High-voltage high-frequency transformer design for a 7.2kV to 120V/240V 20kVA solid state transformer,*” IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.), pp. 493–498, 2010.
- [13] J. R. Rodríguez, E. L. Moreno-Goytia, and V. Venegas R, “*State of the art, modeling and simulation of an advanced power electronics transformer,*” 2012 North Am. Power Symp. NAPS 2012, 2012.
- [14] Y. Chun-gi, C. Younghoon, “*Active Hybrid Solid State Transformer Based on Multi-Level Converter Using SiC MOSFET,*” Energies No.12, 2019.
- [15] J. Liu, H. Zeng, and B. Yang, “*Research on a Novel Hybrid Transformer for Smart Distribution Network,*” *IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 818–823, 2018.
- [16] J. Kaniewski, Z. Fedyczak, and P. Szczesniak, “*Three-phase hybrid transformer using matrix-chopper as an interface between two AC voltage sources,*” no. June, 2014.
- [17] P. Valtonen, G. Mendes, and S. Honkapuro, “*Demand response for increased grid flexibility: The case of Finland,*” *2017 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia Smart Grid Smart Community, ISGT-Asia 2017*, pp. 1–6, 2018.
- [18] B. K. Bose and L. Fellow, “*Energy, Environment, and Advances in Power,*” *Ind. Electron. 2000. ISIE 2000. Proc. 2000 IEEE Int. Symp.*, vol. 15, no. 4, pp. 688–701, 2000.
- [19] D. Tan and D. Novosel, “*Energy Challenge, Power Electronics & Systems (PEAS) Technology and Grid Modernization,*” *CPSS Trans. Power Electron. Appl.*, vol. 2, no. 1, pp. 3–11, 2017.
- [20] L. M. Tolbert, T. J. King, B. Ozpineci et al “*Power Electronics for Distributed Energy Systems and Transmission and Distribution Applications,*”. Distribution Applications ORNL/TM-2005/230. December, 2005.
- [21] European Technology Platform Smart Grids, “*Strategic Deployment Document for Europe’s Electricity Networks of the Future,*”. EUR 22040, 2006.
- [22] E. Mircea, L. Chen-Ching, E. Abdel-Aty, “*FACTS Technologies, in Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence,*”. IEEE, 2016, pp. doi: 10.1002/9781119175391.part2
- [23] X. Sheng, W. Tongzhen and H. Qunhai, “*Optimal configuration of multi-DFACTS joint operation in distributed network,*” IEEE Conference and Expo Transportation

- Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing, 2014, pp. 1-5. doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941062
- [24] A. Yazdani, R. Iravani, *Electronic Power Conversion, Voltage-Source Converters in Power Systems: Modeling, Control and Applications*, in *IEEE PRESS, WILEY*, 2010.
- [25] S. Cole and R. Belmans, “A proposal for standard VSC HVDC dynamic models in power system stability studies,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 4, pp. 967–973, 2011.
- [26] IEEE Std 1159-1995, *IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality*, vol. 2009, no. June. 1995.
- [27] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso and H. Wayne Beaty, “*Electrical Power Systems Quality, Second Edition.*”
- [28] J. Arizpe Islas, S. Neira Rosales, and A. López Escamilla, “*Calidad de energía y sistemas eléctricos de potencia,*” *Ingenierías*, vol. 1, no. 1, pp. 29–54, 2013.
- [29] IEEE, “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society,” *ANSI/IEEE Std. 519*, vol. 2014, 2014.
- [30] N. Ahmad Azli, “*Performance evaluation of custom power devices in power distribution networks to power quality improvement: a review,*” *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, no. 5, pp. 44–49, 2013.
- [31] T. E. Grebe, “*Application of distribution system capacitor banks and their impact on power quality,*” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 3, pp. 714–719, 1996.
- [32] S. A. Temerbaev and V. P. Dovgun, “*Improvement of power quality in distributed generation systems using hybrid power filters,*” *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, pp. 694–698, 2014.
- [33] J. Arrillaga, Y.H. Liu, and N.R. Watson, “*Semiconductor Power Devices, in Flexible Power Transmission,*”. 2007, John Wiley & Sons, Ltd. p. 21-56
- [34] M. Farhoodnea, A. Mohamed, and H. Shareef, “*A comparative study on the performance of custom power devices for power quality improvement,*” *2014 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia, ISGT ASIA 2014*, pp. 153–157, 2014.
- [35] P. T. Ogunboyo, R. Tiako, and I. E. Davidson, “*Application of Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement in Low Voltage Electrical Power*

- Distribution Network: An Overview,” Int. J. Eng. Res. Africa*, vol. 28, no. February 2015, pp. 142–156, 2017.
- [36] F. Jurado, N. González, J. Barrera, M. Barrera, and J. Segundo, “*Modelado y operación del compensador estático de distribución*,” *Revista Iberoamericana de Ciencias*, ISSN 2334-2501, 2014.
- [37] Swaroopa S. Bhosale, Y. N. Bhosale, Uma M. Chavan and Sachim A. Malkevar “*Power Quality Improvement By Using Upqc With Fuzzy Controller*,” *Ijitr*, vol. 6, no. 1, pp. 7758–7765, 2018.
- [38] S. N. Gohil, M. V. Makwana, K. T. Kadivar, and G. J. Tetar, “*Three phase unified power quality conditioner (UPQC) for power quality improvement by using UVTG technique*,” *Proc. - 2013 Int. Conf. Renew. Energy Sustain. Energy, ICRESE 2013*, pp. 151–156, 2014.
- [39] X. She, R. Burgos, G. Wang, F. Wang, and A. Q. Huang, “*Review of SST in the Distribution System From Components to Field Application*,” *Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), 2012 IEEE*, pp. 4077–4084, 2012.
- [40] E. McMurray, “*Power converter circuits having a high frequency link*,” U.S. Patent US3517300, 1968.
- [41] J. L. Brooks, “*Solid state regulated power transformer with waveform conditioning capability*,” U.S. Patent US4347474 A, 1980.
- [42] L. Alonso Acuña Murillo.”*Transformadores de Estado Sólido*”, Conference Paper, febrero, 2014.
- [43] J. Burkard and J. Biela, “*Evaluation of topologies and optimal design of a hybrid distribution transformer*,” *2015 17th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE-ECCE Eur. 2015*, no. C, 2015.
- [44] J. Burkard and J. Biela, “*Protection of hybrid transformers in the distribution grid*,” *2016 18th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2016 ECCE Eur.*, 2016.
- [45] S. Bala, D. Das, E. Aeloiza, A. Maitra, and S. Rajagopalan, “*Hybrid distribution transformer: Concept development and field demonstration*,” *2012 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2012*, pp. 4061–4068, 2012.
- [46] P. Szczesniak, “*A modelling of AC voltage stabilizer based on a hybrid transformer with matrix converter*,” *Arch. Electr. Eng.*, vol. 66, no. 2, pp. 371–382, 2017.

- [47] Mietek T. Glinkowski and Mark Perkins, “*Systems and Methods for Providing Voltage Regulation Externally to a Power Transformer*” U.S. Patent US 6,545,453 B2, 2003.
- [48] Haj-Maharsi et al., “*Hybrid Distribution Transformer with an Integrated Voltage Source Converter*,” U.S. Patent US 2010/0220499 A1, 2010.
- [49] Haj-Maharsi et al., “*Hybrid Distribution Transformer with AC & DC Power Capabilities*,” U.S. Patent US 2010/0201338 A1, 2010.
- [50] Haj-Maharsi et al., “*Versatile Distribution Transformer*,” U.S. Patent US 2010/0315190 A1, 2010.
- [51] Haj-Maharsi et al., “*A Versatile Distribution Transformer*,” EUR. Patent EP 2 441 077 B1, 2010.
- [52] Haj-Maharsi et al., “*A Versatile Distribution Transformer*,” WIPO Patent WO 2010/144805 A1, 2010.
- [53] Haj-Maharsi et al., “*Versatile Distribution Transformer*,” China Patent CN 102804294 B, 2015.
- [54] Wijekoon et al., “*Power Quality Control*,” U.S. Patent US 2014/0133185 A1, 2014.
- [55] Sandeep Bala, “*Distribution Transformer*,” U.S. Patent US 2015/0263636 A1, 2015.
- [56] C. Eckhardt and S. Timothy Watts “*Distribution Transformer Interface Apparatus and Methods*,” U.S. Patent US 10,116,204 B1, 2018.
- [57] Sandeep Bala, “*Distribution Transformer*,” U.S. Patent US 10,014,791 B2, 2018.
- [58] CHAPMAN. 2005. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [59] P. Musznicki, “Chapter 5. Isolated converters,” *Conduct. EMI DC-DC Convert.*, pp. 83–102, 2018.
- [60] N. Muñoz-Galeano, J. B. Cano-Quintero, and J. M. López-Lezama, “*Enseñando el funcionamiento de los inversores puente H: análisis del intercambio de potencia entre bobinas y condensadores*,” *Form. Univ.*, vol. 9, no. 1, pp. 117–124, 2016.
- [61] D. W. Hart. “*Power Electronics*,” 1st. Ed. EUA: McGraw-Hill, 2011.
- [62] J. R. Rodriguez, E. L. Moreno-Goytia, V. Venegas-Rebollar, D. Campos-Gaona, R. A. Felix, and L. E. Ugalde-Caballero, “*Current-sensorless control of an SPWM H-Bridge-based PFC rectifier designed considering voltage sag condition*,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 130, pp. 181–191, 2016.

- [63] X. Wang, J. Liu, S. Ouyang, and F. Meng, “*Research on unbalanced-load correction capability of two power electronic transformer topologies,*” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 6, pp. 3044–3056, 2015.
- [64] X. Wang, J. Liu, T. Xu, X. Wang, and L. Xiong, “*Control of a three-stage three-phase cascaded modular power electronic transformer,*” *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 1309–1315, 2013.
- [65] R. N. Anderson and H. Gharavi, “*Smart Grid: The Future of the Electric Energy System,*” no. June, 2018.

APÉNDICES

Apéndice A: Hoja de datos del IGBT modelo G4PC50FD

International
IR Rectifier

PD 91469B

IRG4PC50FD

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH
ULTRAFAST SOFT RECOVERY DIODE

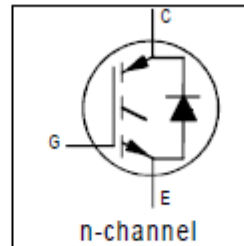
Fast CoPack IGBT

Features

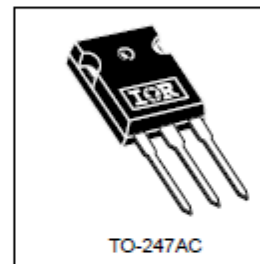
- Fast: Optimized for medium operating frequencies (1-5 kHz in hard switching, >20 kHz in resonant mode).
- Generation 4 IGBT design provides tighter parameter distribution and higher efficiency than Generation 3
- IGBT co-packaged with HEXFRED™ ultrafast, ultra-soft-recovery anti-parallel diodes for use in bridge configurations
- Industry standard TO-247AC package

Benefits

- Generation -4 IGBT's offer highest efficiencies available
- IGBT's optimized for specific application conditions
- HEXFRED diodes optimized for performance with IGBT's . Minimized recovery characteristics require less/no snubbing
- Designed to be a "drop-in" replacement for equivalent industry-standard Generation 3 IR IGBT's



$V_{CES} = 600V$
 $V_{CE(on) typ.} = 1.45V$
@ $V_{GE} = 15V, I_C = 39A$



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
V_{CES}	Collector-to-Emitter Voltage	600	V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Collector Current	70	A
$I_C @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Collector Current	39	
I_{CM}	Pulsed Collector Current (1)	280	
I_{LM}	Clamped Inductive Load Current (2)	280	
$I_F @ T_C = 100^\circ C$	Diode Continuous Forward Current	25	
I_{FM}	Diode Maximum Forward Current	280	
V_{GE}	Gate-to-Emitter Voltage	± 20	V
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Maximum Power Dissipation	200	W
$P_D @ T_C = 100^\circ C$	Maximum Power Dissipation	78	
T_J	Operating Junction and	-55 to +150	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 sec.	300 (0.063 in. (1.6mm) from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 Screw.	10 lbf-in (1.1 N-m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case - IGBT	-----	-----	0.64	°C/W
$R_{\theta VD}$	Junction-to-Case - Diode	-----	-----	0.83	
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, flat, greased surface	-----	0.24	-----	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient, typical socket mount	-----	-----	40	
Wt	Weight	-----	6 (0.21)	-----	g (oz)

www.irf.com

1

12/30/00

Apéndice B: Optoacoplador TLP250

TOSHIBA

TLP250

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC

TLP250

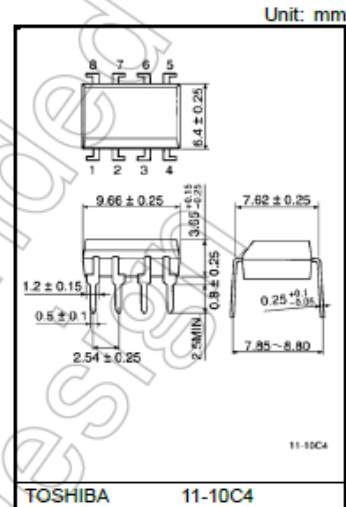
Industrial Inverter
Inverter For Air Conditioner
IGBT Gate Drive
Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
This unit is 8-lead DIP package.
TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: 5mA(max)
- Supply current : 11mA(max)
- Supply voltage : 10-35V
- Output current : $\pm 1.5A$ (max)
- Switching time t_{pLH}/t_{pHL} : 0.5 μs (max)
- Isolation voltage: 2500V_{rms}(min)
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- c-UL approved : CSA Component Acceptance Service
No. 5A, File No.E67349

- Option(D4)
VDE Approved : EN60747-5- 5

Note: When a EN60747-5-5 approved type is needed,
Please designate "Option(D4)"

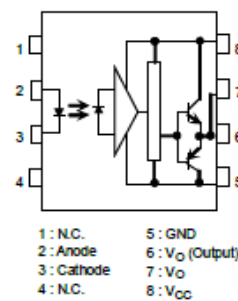


Weight: 0.54 g (typ.)

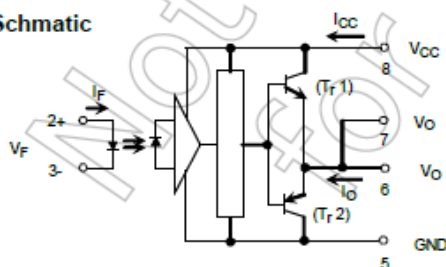
Truth Table

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

Pin Configuration (top view)



Schematic



A 0.1 μF bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5

Start of commercial production
1990-11

Apéndice C: Amplificador de aislamiento, usado para el sensor de voltaje del bus de CD



ISO124

SBOS074E – SEPTEMBER 1997 – REVISED JUNE 2018

ISO124 ± 10 -V Input, Precision Isolation Amplifier

1 Features

- 100% Tested for High-Voltage Breakdown
- Rated 1500 Vrms
- High IMR: 140 dB at 60 Hz
- Maximum Nonlinearity: 0.010%
- Bipolar Operation: $V_O = \pm 10$ V
- Packages: PDIP-16 and SOIC-28
- Ease of Use: Fixed Unity Gain Configuration
- Supply Range: ± 4.5 -V to ± 18 -V

2 Applications

- Industrial Process Control:
 - Transducer Isolator, Isolator for Thermocouples, RTDs, Pressure Bridges, and Flow Meters, 4-mA to 20-mA Loop Isolation
- Ground Loop Elimination
- Motor and SCR Control
- Power Monitoring
- PC-Based Data Acquisition
- Test Equipment

3 Description

The ISO124 is a precision isolation amplifier incorporating a novel duty cycle modulation-demodulation technique. The signal is transmitted digitally across a 2-pF differential capacitive barrier. With digital modulation, the barrier characteristics do not affect signal integrity, thus resulting in excellent reliability and good high-frequency transient immunity across the barrier. Both barrier capacitors are imbedded in the plastic body of the package.

The ISO124 is easy to use. No external components are required for operation. The key specifications are 0.010% maximum nonlinearity, 50-kHz signal bandwidth, and $200\text{-}\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ V_{OS} drift. A power supply range of ± 4.5 V to ± 18 V, and quiescent currents of ± 5 mA on V_{S1} and ± 5.5 mA on V_{S2} make the ISO124 device a good choice for a wide range of applications.

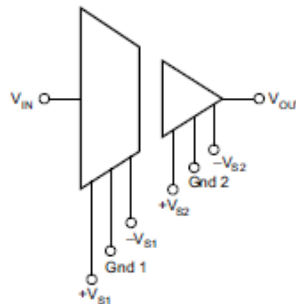
The ISO124 is available in 16-pin PDIP and 28-lead SOIC plastic surface-mount packages.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
ISO124	PDIP (16)	17.90 mm × 7.50 mm
	SOIC (28)	20.01 mm × 6.61 mm

(1) For all available packages, see the package option addendum at the end of the data sheet.

Simplified Schematic



Apéndice D: Fuentes de voltaje CD-CD de 5V



CME Series

Isolated 0.75W Single Output Isolated DC-DC Converters



FEATURES

- Short circuit protection options
- UL 60950 recognised
- Single Isolated output
- 1kVDC or 3kVDC option 'Hi Pot Test'
- Wide temperature performance at full 0.75W load -40°C to 85°C
- Industry Standard Pinout
- 3.3V and 5V Inputs
- 3.3V, 5V & 12V outputs
- Pin Compatible with LME, MEE1, MEE3, NKE, NME, & NML series

PRODUCT OVERVIEW

The CME series are a cost effective 0.75W DC-DC converter series, in industry standard packages with industry standard pinout, Popular input and output voltages are available as a lower power alternative to a 1W DC-DC converter. The galvanic isolation allows the device to be configured to provide an isolated negative rail in systems where only positive rails exist. The wide temperature range guarantees startup from -40°C and full 0.75 watt output at 85°C. For the short circuit protected parts (PC) protection is continuous and auto-resetting on removal of the short circuit.

SELECTION GUIDE

Order Code	Nominal Input Voltage V	Output Voltage V	Output Current mA	Input Current at Rated Load mA	Load Regulation		Ripple & Noise		Efficiency		Isolation Capacitance pF	MTTF	
					%		mV p-p		%			MIL	Tel.
					Typ.	Max.	Typ.	Max.	Min.	Typ.		kHrs	
CME0505DC	5	5	150	218	10	12	15	25	67	70	30	3400	
CME0505SC	5	5	150	218	10	12	15	25	67	70	30	3400	
CME0512SC	5	12	63	195	5	7	20	30	72	77	33	2200	
3KVDC isolation options													
CME0303S3C	3.3	3.3	227	300	9	12	15	25	66	73	30	1230	
CME0305S3C	3.3	5	150	300	9	12	15	25	68	73	35	630	
CME0505S3C	5	5	150	218	9	12	15	25	65	70	28	2400	
CME0512S3C	5	12	63	200	5	7	10	15	70	75	30	630	
Short Circuit Protection Options													
CME0505SPC	5	5	150	195	7.5	9	11	25	74	76.5	22	2887	47047
CME0505DPC	5	5	150	195	7.5	9	11	25	74	76.5	22	2887	47047

INPUT CHARACTERISTICS

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Voltage range	Continuous operation, 3.3V input types	2.97	3.3	3.63	V
	Continuous operation, 5V input types	4.5	5.0	5.5	
Input short circuit current	Short circuit variants		95		mA
	3.3V input types		1.5	2	
Input reflected ripple current	5V input types		2	2.5	mA p-p
	Short circuit types		3	15	

OUTPUT CHARACTERISTICS

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Rated Power ¹	T _A = -40°C to 85°C, see derating graphs			0.75	W
Voltage Set Point Accuracy	See tolerance envelope				
Line regulation	High V _{in} to low V _{in} ; Short circuit types		1.15	1.2	%/%
	High V _{in} to low V _{in} ; All other output types		1.0	1.2	

ISOLATION CHARACTERISTICS

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Isolation test voltage	C Versions Flash tested for 1 second	1000			VDC
	3C Versions Flash tested for 1 second	3000			
Resistance	Viso = 1000VDC		10		GΩ

GENERAL CHARACTERISTICS

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Switching frequency	CME0505XC		120		kHz
	Short circuit types		91		
	All other types		135		

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Lead temperature 1.5mm from case for 10 seconds	260°C
Input voltage V _{in} , 3.3V input	5.5V
Input voltage V _{in} , 5V input	7V



For full details go to
www.murata-ps.com/rohs



1. Calculated using MIL-HDBK-217 FN2 and Telcordia SR-332 calculation model with nominal input voltage at full load.
2. See derating curve.
All specifications typical at T_A = 25°C, nominal input voltage and rated output current unless otherwise specified.