



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Diseño de un Generador Trifásico de Hundimientos e Interrupciones de Voltaje AC**

**Giovanni Aldemar Baquero Rozo**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Bogotá, Colombia  
2014

---



# **Diseño de un Generador Trifásico de Hundimientos e Interrupciones de Voltaje AC**

**Giovanni Aldemar Baquero Rozo**

Tesis de Maestría presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería – Ingeniería Eléctrica**

Director (a):

PhD. Fabio Andrés Pavas Martínez

Línea de Investigación:

CALIDAD DE LA ENERGIA

Grupo de Investigación:

Programa de Investigación sobre adquisición y análisis de señales, universidad Nacional de Colombia (PAAS-UN)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2014

---



*Dedicatoria*

*Deo gratias, labor omnia vincit.*





## Agradecimientos

Agradezco a mi director de tesis de maestría, el Phd. Andrés Pavas Martínez por su apoyo, colaboración y asesoría.

Agradezco al grupo de investigación PAAS-UNAL (Programa de investigación sobre adquisición y análisis de señales de la Universidad Nacional de Colombia), por el aporte en el planteamiento del presente proyecto.

Agradezco al grupo de investigación EM&D-UNAL (Eléctrica Machine & drivers de la Universidad Nacional de Colombia), por su colaboración en la consecución del transformador Zig-Zag necesario para la construcción del generador de perturbaciones.

Agradezco a la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá (DIB) por su apoyo económico de Diez Millones de Pesos M/cte (\$10'000.000) a través de la convocatoria "Apoyo de la DIB a Tesis de Investigación en Posgrado". Código del proyecto: 13158, Resolución 696 de 04 de abril de 2011 de la Vicerrectoría de Sede, Sede Bogotá.

Agradezco al grupo de estudiantes de la Asignatura Calidad de la Energía 2014-03 y al *Docente: Ing Andrés Pavas Martínez*, por su colaboración en el análisis de resultados derivados del conjunto de pruebas realizada con el equipo generador, y la obtención a partir de estas del reporte de inmunidad de un equipo EUT.

---



## Resumen

El propósito de esta Tesis es el desarrollo de un equipo generador trifásico de hundimientos de tensión SAG/DIP e interrupciones de corta duración. Este generador debe producir de manera controlada perturbaciones de voltaje, y permitir la adquisición y registro de las variables de corriente y voltaje en el equipo en prueba (EUT). En particular se diseñó el generador para cumplir con normas internacionales, tales como: IEEE 1159, IEC 61000-4-34, IEC-61000-4-11, ITIC, CBEMA y SEMI F47. En el diseño, desarrollo e implementación del generador se realizaron algunas modificaciones, las cuales permiten producir otros tipos de perturbaciones de voltaje adicionales, tales como; elevaciones de tensión (Swell), Aumentos de tensión, bajas tensiones (Subtensiones), interrupciones de larga duración y fluctuaciones de tensión (Flicker).

El generador de perturbaciones se desarrolló para soportar la conexión de diferentes tipos de cargas: resistivas, equipos electrónicos, circuitos de rectificación y filtrado, motores AC, etc... ya que con la adecuada conexión de las cargas el equipo soporta picos de corriente, distorsiones de la forma de onda y desfase de la corriente. El equipo también cuenta con protecciones contra: sobretensiones, sobrecorrientes, sobre temperatura, y desaturación de los interruptores de potencia.

Finalmente y como logro más importante, se puso al servicio de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, un equipo que habrá la posibilidad de realizar pruebas de perturbaciones, pruebas de inmunidad y pruebas de envejecimiento de equipos. Este equipo es el primero en sus características en el país, y permitirá apoyar trabajos futuros en docencia, en proyectos de investigación y de extensión.

**Palabras clave:** Calidad de la Energía, Compatibilidad Electromagnética, Perturbación de Tensión, Inmunidad, Hundimiento, Interrupción, Elevación, Fluctuación.

---

## Abstract

The purpose of this Thesis is the development of a three-phase generator of SAG/DIP's voltage and short interruptions. This generator is designed to produce voltage disturbances that can be produced in controlled fashion. As complementary functions added to device, it is possible to perform data acquisition and to register the voltage and the current in the equipment under test (EUT). Specifically, this voltage generator is designed to compliance international standards, such as: IEEE 1159, IEC 61000-4-34, IEC 61000-4-11-, ITIC, CBEMA and SEMI-F47. In the design, development and implementation of the generator, we propose modifications which allow to produce other types of voltage disturbances such as: Swell, Overvoltage, Undervoltage and Flicker.

The disturbance generator was developed to allow the connection of different types of loads: resistive, electronic equipment, rectify and filter circuits, AC motors, etc. With the correct connection of the equipment, it is able to test different types of loads, with waveform distortion, current shift phase, and unbalances. The equipment includes protections for: overvoltage, overcurrent, over temperature, and switch IGBT desaturation.

Finally, the equipment will be in service at the Electrical Engineering laboratory of the National University of Colombia in Bogotá. Using this device, it will possible to carry out disturbance and immunity tests on equipment. This generator is the first one developed in Colombia, and it will support future work in teaching, research and extension.

**Keywords:** Power Quality, Electromagnetic Compatibility, voltage Perturbation, Immunity, SAG/DIP, SWELL, FLICKER.

# Contenido

	..... Pág.
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XIV</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XIX</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas</b>	<b>XXI</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
Contenido	
<b>1. Perturbaciones Electromagnéticas en Calidad de Energía</b>	<b>.....9</b>
1.1 Tipos de Perturbaciones Electromagnéticas .....	11
1.1.1 Transitorios electromagnéticos (TEM) .....	11
1.1.2 Variaciones de tensión y corriente de corta duración .....	12
1.1.3 Hundimientos de tensión, SAG/DIP .....	13
1.1.4 Elevaciones de tensión, SWELL .....	13
1.1.5 Interrupciones o pérdidas completas de Tensión .....	14
1.1.6 Variaciones de tensión y corriente de larga duración .....	15
1.1.7 Desbalances de tensión o corriente .....	16
1.1.8 Fluctuaciones de Voltaje (Flickers) .....	16
1.1.9 Eventos de la magnitud de voltaje .....	17
1.2 Normas y estándares sobre compatibilidad electromagnética y pruebas de inmunidad .....	19
1.3 Especificaciones para el generador trifásico de perturbaciones .....	23
<b>2. Generadores de Perturbaciones de Tensión</b>	<b>.....29</b>
2.1 Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador o autotransformador por conmutación de taps .....	30
2.2 Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie .....	37

2.3	Generador de perturbaciones de tensión basado en reactor controlado por tiristor, por conmutación de impedancia en paralelo.....	42
2.4	Generador de perturbaciones de tensión basado en convertidor conmutado o amplificador de potencia.....	44
2.5	Comparación de las principales topologías para Generadores de perturbaciones de tensión.....	48
	Comparación por utilidad, versatilidad y simplicidad .....	48
2.6	Metodología para el diseño e implementación del Generador de perturbaciones de tensión.....	53

### **3. Arquitectura y módulos de potencia del Generador de Perturbaciones de tensión.59**

3.1	Tablero de Mando .....	65
3.1.1	Problemas y recomendaciones.....	66
3.2	Protecciones.....	67
3.2.1	Interruptores termomagnéticos trifásicos .....	67
3.2.2	Circuitos Electrónicos de Protección.....	68
3.2.3	Problemas y recomendaciones.....	68
3.3	Sistema de Alimentación DC aislada .....	69
3.4	Transformador Trifásico ZIG-ZAG .....	72
3.4.1	Tipos de Transformadores Zig-Zag.....	72
3.4.2	Análisis configuración de taps del Transformador Zig-Zag .....	76
3.4.3	Diseño del Transformador Zig-Zag .....	81
3.5	Etapa de Potencia: Interruptores Bidireccionales.....	83
3.5.1	Arquitectura del interruptor bidireccional.....	84
3.5.2	Interruptor bidireccional basado en módulos IGBT .....	86
3.5.3	Circuito Driver de control de compuerta para IGBT .....	89
3.5.4	Montaje del interruptor bidireccional con módulos IGBT .....	99
3.5.5	Pruebas de funcionamiento de los Interruptores bidireccionales IGBT .....	102

### **4. Sistema de control, Interfaz HMI-GUI y módulos de instrumentación ..... 114**

4.1	Módulos de medición y acondicionamiento de señales analógicas de corriente y voltaje.....	115
4.1.1	Módulo de medición de corriente .....	115
4.1.2	Módulo de medición de voltaje .....	120
4.2	Sistema de Control para el generador trifásico de perturbaciones de tensión.....	124
4.2.1	Arquitectura del sistema de Control.....	124
4.2.2	Tarjeta de acondicionamiento de señales digitales.....	127
4.2.3	Circuito de sincronismo con la red eléctrica.....	131
4.2.4	Circuito de parada de emergencia.....	132
4.2.5	Tarjeta de adquisición de señales: DAQ.....	133
4.2.6	Sistema de control: Tarjeta microcontrolada ARDUINO.....	135
4.2.7	Sistema de control, supervisión e interfaz GUI-HMI: PC.....	144
4.2.8	Montaje e Integración de los módulos del generador trifásico de perturbaciones de tensión .....	153

---

<b>5. Pruebas del Generador de Perturbaciones</b>	<b>.....159</b>
5.1 Protocolo de Prueba .....	159
5.2 Pruebas de Funcionamiento .....	162
5.2.1 Pruebas de funcionamiento con carga Resistiva.....	162
5.2.2 Pruebas de funcionamiento con carga RC.....	172
5.2.3 Pruebas de funcionamiento con carga RL (Motor AC) .....	174
5.3 Pruebas de Inmunidad.....	182
<b>6. Resultados y Conclusiones</b>	<b>.....193</b>
6.1 Resultados.....	193
6.2 Conclusiones .....	194
6.3 Contribuciones.....	195
6.4 Costos.....	196
6.5 Recomendaciones y trabajo futuro .....	197
<b>7. Bibliografía</b>	<b>203</b>
<b>A. Anexo: Calculo de los voltajes de los taps del transformador Zig-Zag.....</b>	<b>247</b>

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Hundimiento de tensión, SAG/DIP. [7] .....	13
Figura 1-2: Elevación de tensión, SWELL [15] .....	14
Figura 1-3: Interrupción de tensión [15] .....	14
Figura 1-4: Variación de tensión de larga duración: Bajo Voltaje y Sobre voltaje [17]. ....	15
Figura 1-5: Fluctuación de tensión (Flicker) [12] .....	16
Figura 1-6: Fluctuación de tensión rectangular (Flicker) [13] .....	17
Figura 1-7: Eventos de magnitud de voltaje, norma IEEE 1159 [12] .....	18
Figura 2-1: Generador de perturbaciones de tensión basado en autotransformador (EPRI [41] [43] .....	31
Figura 2-2: Generador de perturbaciones de tensión basado en autotransformador. Norma IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34. [7] [8] .....	32
Figura 2-3: Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador conmutado. [42] .....	33
Figura 2-4: Ejemplo: Generador trifásico de perturbaciones basado en SSR's [46] .....	34
Figura 2-5: Secuencia de control para un Generador trifásico de perturbaciones basado en SSR's. [46] .....	34
Figura 2-6: Ejemplo: Generador trifásico de perturbaciones de tensión basado en interruptores con transistores IGBT [44] [45] .....	35
Figura 2-7: Ejemplo: Generador monofásico de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie. [42] .....	37
Figura 2-8: Ejemplo: Generador monofásico de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie e Inversor AC [47] .....	38
Figura 2-9: Ejemplo: Generador monofásico de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie con Inversor AC [48] .....	40
Figura 2-10: Ejemplo: Generador Trifásico de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie con Inversor AC [49] .....	40
Figura 2-11: Diagrama vectorial de la generación de la tensión inyectada por el Generador Trifásico de perturbaciones de tensión SSFG [49] .....	41
Figura 2-12: Esquema de conexión de una impedancia en paralelo para la generación de perturbaciones de tensión [44] [45] .....	42
Figura 2-13: Ejemplo: Generador de perturbaciones de tensión basado en reactor controlado por tiristor, por conmutación de impedancia en paralelo [42] [50] [51] .....	43

Figura 2-14: Ejemplo: Generador de perturbaciones de tensión tipo flicker, basado en Amplificador lineal [52].	45
Figura 2-15: Ejemplo: Generador de perturbaciones de tensión, basado en convertidor de conmutado de potencia, configuración Back-to-Back. [44] [45].	46
Figura 2-16: Ejemplo: Generador de perturbaciones de tensión, basado en convertidor de conmutado de potencia, configuración Inversor AC. [54] [55].	47
Figura 2-17: Metodología de diseño e implementación del generador de perturbaciones.	54
Figura 3-1: Diagrama general del generador de perturbaciones de tensión, basado en transformador por conmutación de Taps.	61
Figura 3-2: Arquitectura del generador de perturbaciones de tensión, basado en un transformador por conmutación de Taps.	64
Figura 3-3: Tablero de mando generador de perturbaciones de tensión.	65
Figura 3-4: Instalación actual de los termomagnéticos de protección en el generador.	67
Figura 3-5: Esquema fuente de alimentación DC aislada No-regulada.	70
Figura 3-6: Desarrollo fuentes de alimentación DC aislada No-regulada. (KiCad)	71
Figura 3-7: Conexión Dz0 de un transformador Zig-Zag [59].	73
Figura 3-8: Conexión Dz6 de un transformador Zig-Zag [59].	74
Figura 3-9: Conexión Yz1 de un transformador Zig-Zag [59].	75
Figura 3-10: Transformador Zig-Zag, Marca: Fyr Ingenieros Ltda.	82
Figura 3-11: Esquema básico del interruptor bidireccional IGBT-Diodo [44] [45].	83
Figura 3-12: Arquitectura del interruptor bidireccional IGBT-Diodo.	86
Figura 3-13: Componentes interruptor bidireccional, módulo IGBT-Diodo y snubber [62].	87
Figura 3-14: Sistema de refrigeración del interruptor de potencia.	88
Figura 3-15: Circuito Driver de compuerta para IGBT.	89
Figura 3-16: Circuito de protección y detección contra sobrecorrientes.	90
Figura 3-17: Circuito térmico del módulo IGBT.	92
Figura 3-18: Circuito para detección de sobre temperatura del módulo IGBT.	93
Figura 3-19: Circuito para la retención del estado de fallo/alarma e inhibición de la activación.	94
Figura 3-20: Circuitos transmisor y receptor para el aislamiento óptico de señales.	96
Figura 3-21: Esquema completo circuito driver de control de compuerta para IGBT.	97
Figura 3-22: Diseño PCB, Circuito driver de control de compuerta para IGBT. (KiCad)	98
Figura 3-23: Montaje tarjeta PCB, Circuito driver de control de compuerta para IGBT.	98
Figura 3-24: Montaje tarjeta PCB, Circuito driver de control de compuerta para IGBT.	99
Figura 3-25: Integración del circuito driver y el módulo IGBT del interruptor bidireccional.	100
Figura 3-26: Integración del interruptor bidireccional en el equipo generador trifásico de perturbaciones de tensión.	101
Figura 3-27: Circuito de prueba de conmutación para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.	102

---

Figura 3-28: Montaje de prueba de conmutación para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.....	103
Figura 3-29: Resultados de la prueba de conmutación y funcionamiento para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.....	103
Figura 3-30: Modelo del interruptor bidireccional IGBT y los Snubber de protección.....	104
Figura 3-31: Circuito de prueba de medición de corriente de fuga en DC para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.....	105
Figura 3-32: Montaje y Resultados de la prueba de medición de corriente de fuga en DC para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.....	106
Figura 3-33: Circuito de prueba de medición de corriente de fuga en AC para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.....	107
Figura 3-34: Montaje y resultado de la prueba de medición de corriente de fuga en AC para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.....	107
Figura 3-35: Montaje y resultado de la prueba de la protección de desaturación del transistor para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.....	109
Figura 3-36: Montaje y resultado de la prueba de la protección de sobrecorriente para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.....	110
Figura 3-37: Montaje y resultado de la prueba de la protección de sobre temperatura para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.....	111
Figura 4-1: Diseño circuito de medición de corriente. (KiCad).....	117
Figura 4-2: Diseño circuito impreso PCB, tarjeta de medición de corriente. (KiCad).....	118
Figura 4-3: Montaje de los Sensores de medición de corriente.....	119
Figura 4-4: Montaje del sistema de medición de corriente.....	119
Figura 4-5: Divisor resistivo de precisión de alto voltaje. [78].....	120
Figura 4-6: Diseño del circuito de medición de voltaje. (KiCad).....	122
Figura 4-7: Diseño de la tarjeta PCB de medición de voltaje. (KiCad).....	123
Figura 4-8: Montaje del sistema de medición de corriente en el armario del generador.....	123
Figura 4-9: Arquitectura del Sistema de control del generador de perturbaciones.....	126
Figura 4-10: Diseño tarjeta acondicionamiento de señales digitales.....	128
Figura 4-11: Diseño tarjeta acondicionamiento de señales digitales.....	129
Figura 4-12: Montaje e instalación, tarjeta acondicionamiento de señales digitales.....	130
Figura 4-13: Diseño Circuito de sincronismo con la red eléctrica.....	131
Figura 4-14: Montaje del Circuito de sincronismo con la red eléctrica.....	131
Figura 4-15: Diseño Circuito de parada de emergencia.....	132
Figura 4-16: Montaje Circuito de parada de emergencia.....	132
Figura 4-17: Configuración pines PCI-MIO-16E-4 (NI PCI-6040E). [81].....	134
Figura 4-18: Montaje y conexión externa de la DAQ PCI-MIO-16E-4 (NI PCI-6040E)...	135
Figura 4-19: Tarjeta microcontrolada Arduino UNO [82] [83].....	136
Figura 4-20: Montaje de la Tarjeta microcontrolada Arduino UNO, en el Generador.....	137
Figura 4-21: Diagrama de flujo del programa para el microcontrolador Arduino UNO...	138
Figura 4-22: Comunicación PC- Arduino UNO.....	139

Figura 4-23: Control Arduino: Secuencia de control para los interruptores IGBT en el estado $V_{nominal}$ previo.....	141
Figura 4-24: Control Arduino: Secuencia de control para los interruptores IGBT en el estado $V_{perturbación}$ , prueba tipo 1: ciclos completos.....	141
Figura 4-25: Control Arduino: Secuencia de control para los interruptores IGBT en el estado $V_{perturbación}$ , prueba tipo 2: $\frac{1}{2}$ ciclo.....	142
Figura 4-26: Control Arduino: Secuencia de control para los interruptores IGBT en el estado $V_{nominal}$ posterior, prueba tipo 1: ciclos completos.....	142
Figura 4-27: Control Arduino: Secuencia de control para los interruptores IGBT en el estado $V_{nominal}$ posterior, prueba tipo 2: $\frac{1}{2}$ ciclo.....	143
Figura 4-28: Imagen del diagrama de bloques del programa en LABview.....	145
Figura 4-29: Interfaz GUI-HMI generador trifásico de perturbaciones de tensión.....	146
Figura 4-30: Configuración del menú para registro de datos de una prueba, TDMS (Excel).....	150
Figura 4-31: Ejemplo archivo TDMS (Excel), registro de datos de una prueba.....	151
Figura 4-32: Ejemplo archivo TDMS (Excel), presentación de las señales registradas..	152
Figura 4-33: Montaje e integración de los módulos en el generador trifásico de perturbaciones de tensión, VISTA FRONTAL.....	153
Figura 4-34: Montaje e integración de los módulos en el generador trifásico de perturbaciones de tensión, VISTA DE ATRÁS.....	155
Figura 4-35: Instalación del generador trifásico de perturbaciones de tensión.....	156
Figura 5-1: Circuito de prueba con carga resistiva para el Generador trifásico de perturbaciones de tensión.....	163
Figura 5-2: Montaje de prueba con carga resistiva para el Generador trifásico de perturbaciones de tensión.....	163
Figura 5-3: Resultados prueba hundimiento de tensión trifásico simétrico, Tipo 1: Para Pocos Ciclos completos, carga resistiva.....	164
Figura 5-4: Resultados prueba hundimiento de tensión trifásico simétrico, Tipo 1: para Muchos Ciclos completos, carga resistiva.....	165
Figura 5-5: Resultados de la prueba de hundimiento de tensión trifásico Asimétrico, con desbalance en una fase, Tipo 1: Para Pocos Ciclos completos, carga resistiva.....	166
Figura 5-6: Resultados prueba aumento de tensión (Swell) trifásico simétrico de 120%. .....	167
Figura 5-7: Resultados prueba de Interrupción de Tensión simétrica (0%). Pocos ciclos completos.....	168
Figura 5-8: Resultados prueba de Interrupción de Tensión simétrica (0%). Muchos ciclos completos.....	169
Figura 5-9: Resultados prueba de Interrupción de Tensión simétrica (0%), 1/2 Ciclo....	169
Figura 5-10: Resultados prueba de Interrupción de Tensión simétrica (0%), $\frac{1}{4}$ de Ciclo. .....	170
Figura 5-11: Resultados prueba de fluctuación de tensión (flicker de tipo rectangular)..	171

---

Figura 5-12: Resultados prueba de Hundimiento (SAG/DIP) para carga RC. Pocos ciclos completos. ....	172
Figura 5-13: Resultados prueba de Hundimiento (SAG/DIP) para carga RC. Muchos Ciclos completos.....	173
Figura 5-14: Circuito de prueba con carga RL (Motor AC) para el Generador trifásico de perturbaciones de tensión.....	174
Figura 5-15: Resultados prueba de Hundimiento Simétrico (SAG/DIP) para carga RL. Muchos Ciclos completos.....	175
Figura 5-16: Resultados prueba de Hundimiento Simétrico (SAG/DIP) para carga RL. Muchos Ciclos completos.....	176
Figura 5-17: Conexión de los devanados secundarios del transformador zig-zag para generar un hundimiento de tensión asimétrico desbalanceado en una fase.....	177
Figura 5-18: Resultados prueba de Hundimiento Asimétrico Desbalanceado en una fase para carga RL. Muchos Ciclos completos. ....	178
Figura 5-19: Resultados gráficos del archivo Excel (.tdms), prueba de Hundimiento Asimétrico Desbalanceado en una fase: 61%, 25°, carga RL (motor AC trifásico). ....	179
Figura 5-20: Conexión de los devanados secundarios del transformador zig-zag para generar un hundimiento de tensión asimétrico desbalanceado en dos fases. ....	180
Figura 5-21: Resultados prueba de Hundimiento Asimétrico Desbalanceado en dos fases para carga RL. Muchos Ciclos completos. ....	181
Figura 5-22: Resultados gráficos del archivo Excel (.tdms), prueba de Hundimiento Asimétrico Desbalanceado en dos fases: 61%, 25°/95°, carga RL (motor AC trifásico). ....	181
Figura 5-23: Montaje de prueba con cargas LFC. ....	184
Figura 5-24: Resultados prueba de inmunidad Bombillas LFC: análisis factor de potencia prueba Test#27. <i>(Imagen tomada de los resultados del análisis de los datos de las pruebas, en el desarrollo del curso de calidad de energía 2014-03, Docente: Ing Andrés Pavas Martínez)</i> .....	186
Figura 5-25: Montaje de prueba con carga trifásica: Motor AC trifásico de inducción....	187
Figura 5-26: Resultados prueba de inmunidad Motor AC: análisis valores RMS, Potencias y factor de potencia por ciclos. <i>(Imagen tomada de los resultados del análisis de los datos de las pruebas, en el desarrollo del curso de calidad de energía 2014-03, Docente: Ing Andrés Pavas Martínez)</i> .....	189

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Clasificación de los transitorios electromagnéticos [12].	11
Tabla 1-2: Clasificación de las variaciones de corta duración [12].	12
Tabla 1-3: Clasificación de las variaciones de larga duración [10].	15
Tabla 1-4: Propuesta de clasificación de los estándares y pruebas De inmunidad, para la construcción de un generador de perturbaciones por tipo de perturbación.	22
Tabla 1-5-A: Análisis: Especificaciones para el generador trifásico de perturbaciones de tensión (PARTE A).	24
Tabla 1-5-B: Análisis: Especificaciones para el generador trifásico de perturbaciones de tensión (PARTE B).	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 2-1: Comparación de topologías de generadores de perturbaciones de tensión.	51
Tabla 3-1: Arquitectura generador de perturbaciones: Módulos funcionales.	63
Tabla 3-2: Especificaciones de los interruptores termomagnéticos de protección. [56].	68
Tabla 3-3: Elementos utilizados en las fuentes de alimentación DC aisladas.	70
Tabla 3-4: Clasificación de los tipos de hundimientos de tensión SAG/DIP [14] [61].	76
Tabla 3-5: Clasificación de los tipos de hundimientos de tensión SAG/DIP, de acuerdo al comportamiento completo de los fasores de voltaje en sistemas Trifásicos [14] [61].	77
Tabla 3-6: Configuración de taps para cumplimiento de hundimientos de tensión normas IEC 61000-4-11/34, para el transformador Zig-Zag. (Imagen Calculadora en Excel)	78
Tabla 3-7: Configuración de Taps para el transformador Zig-Zag, para cumplimiento de hundimientos de tensión norma IEEE 1159, EN 50160, y curvas de inmunidad ITIC, SEMI F-47, CBEMA. (Imagen Tabla Calculadora en Excel)	79
Tabla 3-8: Configuración de taps para el transformador Zig-Zag, para cumplimiento de Aumentos de tensión normas IEC 61000-4-30, IEEE 1159, EN 50160, y curvas de inmunidad ITC, CBEMA. (Imagen Tabla Calculadora en Excel)	80
Tabla 3-9: Especificaciones Transformador ZIG-ZAG	820
Tabla 3-10: Configuración Final de taps para el transformador Zig-Zag. (Imagen Tabla Excel)	82
Tabla 4-1: Especificaciones requeridas para la medición de corriente. [75] [76].	116

---

Tabla 5-1: Pruebas de inmunidad realizadas según el tipo de carga.....	183
Tabla 5-2: Valoración de los Resultados, prueba de inmunidad para Bombillas LFC....	187
Tabla 5-3: Valoración de los Resultados, prueba de inmunidad para el Motor AC trifásico de inducción.....	190

Tabla 6-1: Costos Generador Trifásico de Tension AC.....	196
--	-----

**Anexos:**

Tabla A-1: C1: Prueba para hundimiento de tensión Sag/Dip fase-neutro, aceptable, método 1.....	247
Tabla A-2: C2: Prueba para hundimiento de tensión Sag/Dip fase-fase, aceptable, método 1.....	248
Tabla A-3: Voltajes requeridos en los taps del transformador, por cada fase.....	248
Tabla A-4: C3: Prueba para hundimiento de tensión Sag/Dip fase-fase, aceptable, método.....	249
Tabla A-5: Voltajes requeridos en los taps del transformador por cada fase.....	249

## Lista de Símbolos y abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>IEC</i>	International Electrotechnical Commission
<i>IEEE</i>	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>EN</i>	European Engineering Standards
<i>CENELEC</i>	European Committee for Electrotechnical Standardization
<i>ITIC</i>	Information Technology Industry council
<i>CBEMA</i>	Computer and Business Equipment Manufacturers Association
<i>CREG</i>	Comisión Reguladora de Gas y Energía
<i>ICONTEC</i>	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
<i>PAAS-UN</i>	Programa de Investigación sobre adquisición y análisis de señales, universidad Nacional de Colombia (Grupo de Investigación - UNAL)
<i>EM&amp;D-UN</i>	Electrical Machines and Drivers (Grupo de Investigación - UNAL)
<i>EMC</i>	Compatibilidad Electromagnética
<i>PQ</i>	Calidad de Energía (Power Quality)
<i>SAG/DIP</i>	Hundimiento de tensión
<i>SWELL</i>	Elevación de tensión
<i>OUTAGE</i>	Interrupción de tensión
<i>FLICKER</i>	Fluctuación de tensión
<i>FLICKEMETER</i>	Instrumento de medición de fluctuaciones, (Flickermetro)
<i>"pu"</i>	Por Unidad
<i>ESD</i>	Descarga electrostática
<i>PCC's</i>	Puntos de conexión común
<i>IPC's</i>	Puntos de conexión en la planta (Instalaciones Industriales)
<i>ASD</i>	Driver control de velocidad
<i>EUT</i>	Equipo en prueba



# Introducción

El presente trabajo se realizó como requisito para optar al título de Magister en Ingeniería – Ingeniería Eléctrica en la universidad Nacional de Colombia.

En Colombia la comisión reguladora de gas y energía (CREG), a través de la resolución 024 de 2005 [1], exige a los operadores de red la medición de parámetros de calidad de eléctrica. Esta resolución se expide debido a la necesidad creciente de un sistema de medición de parámetros de calidad de energía eléctrica, se propone este sistema únicamente asociado a la tensión del sistema. Aunque este parámetro no es suficiente, representa un paso importante en lo referente al estudio, regulación y medición de la calidad de energía eléctrica en el país.

En este sentido, existe la resolución 065 de 2012 de la CREG en la cual se establecen las normas de calidad de potencia eléctrica aplicables en el sistema interconectado nacional [2]. Desde entonces las empresas de distribución de energía eléctrica se han encaminado a la medición y análisis de los parámetros de calidad de energía exigidos por la CREG [3] [4]. Pero en cuanto a nivel experimental en calidad de potencia ha habido pocos desarrollos, para que la implementación de un marco regulatorio sea efectiva es necesario no solo disponer de sistemas de medición y registro de los parámetros de calidad de energía, sino que es determinante disponer de laboratorios de que permitan evaluar el efecto de las perturbaciones en el sistema eléctrico, y que también permitan determinar del impacto de perturbaciones de calidad de potencia sobre equipos.

Actualmente el país no dispone de este tipo de laboratorios, lo cual limita la capacidad de evaluar el efecto de estas perturbaciones. Por lo tanto el desarrollo de equipos de laboratorio en calidad de energía y su disponibilidad, permitirá cubrir un vacío en la industria eléctrica nacional, y el desarrollo de oportunidades de negocio en esta área.

La Universidad Nacional de Colombia ha realizado estudios de la calidad de energía eléctrica, en particular, el grupo de investigación PAAS-UN en colaboración con CODENSA, y otras entidades. Entre los estudios realizados, es importante notar que se han podido identificar a los hundimientos de voltaje AC (SAG's/DIP's) y las interrupciones de tensión como los eventos de perturbación de mayor impacto, y más frecuente ocurrencia en cuanto a calidad de energía eléctrica en el país. Entendiéndose según la normatividad nacional NTC5000 [5] y NTC5001 [6], el hundimiento de tensión como: "la disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado, entre el 90% y el 10% de la tensión declarada  $V_c$ , seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo", y entendiéndose una interrupción de alimentación como: "el evento de caída de tensión por debajo del 10% de la tensión declarada  $V_c$ ".

Por lo tanto se requiere del desarrollo de un laboratorio de calidad de potencia eléctrica, y entre sus equipos requiere un equipo generador de hundimientos de tensión SAG/DIP e Interrupciones de Corta duración. Este generador debe producir de manera controlada perturbaciones de voltaje y a su vez permitir la adquisición de las variables de corriente y voltaje en el equipo en prueba (EUT).

Este proyecto consiste en el desarrollo de un equipo generador trifásico de hundimientos de tensión SAG/DIP e interrupciones de corta duración (una interrupción también puede interpretarse como un hundimiento del 100% de la magnitud). Este generador debe producir de manera controlada perturbaciones de voltaje y a su vez permitir la adquisición y registro de las variables de corriente y voltaje en el equipo en prueba (EUT). En particular se busca que este equipo cumpla con los requerimientos exigidos por las normas internacionales, tales como: IEEE 1159, IEC 61000-4-34, IEC-61000-4-11, ITIC, CBEMA y SEMI F47 [7] [8] [9] [10] [11] [12].

Es importante notar que en el transcurso del diseño, desarrollo e implementación del equipo generador de perturbaciones se realizaron algunas modificaciones, las cuales permiten producir otros tipos de perturbaciones de voltaje adicionales, tales como; elevaciones de tensión (Swell), Aumentos de tensión, bajas tensiones (Subtensiones), interrupciones de larga duración y fluctuaciones de tensión (Flicker) [9] [10] [11] [12] [13].

Sin duda este generador trifásico de perturbaciones de tensión, efectivamente permite simular los comportamientos de la red eléctrica, de efectos como SAG/DIP's, Swell's e Interrupciones de Corta y Larga duración y Flicker's. Lo cual a su vez permitirá realizar múltiples investigaciones relacionadas con los efectos de las perturbaciones en la red eléctrica en cualquier equipo eléctrico como motores AC y/o equipo electrónico como computadores y electrodomésticos cuyo consumo sea menor a 75 Amperios [8].

Este generador también servirá para que la Universidad Nacional de Colombia preste un servicio de pruebas de inmunidad en equipos, servicio que actualmente no se presta en el país, y que permitirá apoyar la industria nacional de equipos electrónicos. También permitirá a través de las pruebas realizadas a dichas cargas establecer mejoras en la normatividad nacional de calidad de energía y de control de calidad de productos.

Los objetivos propuestos para el desarrollo de la siguiente tesis de maestría son:

**Objetivo General:**

Diseñar un equipo generador trifásico de hundimientos de voltaje AC tipo SAG's/DIP's, e interrupciones de corta duración, para pruebas de inmunidad ante variaciones de voltaje RMS en el rango de corriente de 16-50 Amperios y frecuencia 60Hz.

**Objetivos Específicos:**

- Revisar y escoger una topología de diseño apropiada para el generador trifásico de variaciones de voltaje AC.
- Diseñar el equipo generador trifásico de hundimientos de voltaje AC tipo SAG's/DIP's, e interrupciones de corta duración, para que cumpla con norma IEC 61000-4-34.
- Diseñar el equipo generador trifásico de hundimientos de voltaje AC tipo SAG's/DIP's, para que cumpla con las curvas de prueba de inmunidad SEMI F47 e ITIC.
- Diseñar el equipo generador trifásico de hundimientos de voltaje AC tipo SAG's/DIP's, e interrupciones de corta duración, para que permita programar diferentes pruebas de inmunidad de voltaje. Que adicionalmente, pueda realizar el generador de acuerdo a sus características y la norma IEC 61000-4-34.

- Diseño de un módulo de sistema de medición e instrumentación para la adquisición de las señales de voltaje y corriente en el desarrollo de una prueba de inmunidad, para el equipo generador de variaciones de voltaje AC.
- Diseño un módulo de control que permita la programación de las pruebas de inmunidad y para esto reconfigurara las señales de control de los dispositivos de la etapa de potencia del generador de variaciones de voltaje AC. Adicionalmente, el módulo de control debe registrar la información de las señales del equipo en prueba (EUT) obtenidas del módulo de sistema de medición e instrumentación.
- Diseño de un módulo de interruptor de potencia y de su circuito de disparo para la etapa de potencia del generador de variaciones de voltaje AC. Diseño de un módulo interfaz HMI para el equipo generador de variaciones de voltaje AC, que permita visualizar y descargar la información de las señales obtenidas del equipo en prueba (EUT).
- Implementación de prototipos de los módulos propuestos para las etapas del generador de variaciones de voltaje AC, para verificar el diseño.

#### **Alcances y limitaciones:**

Al momento de la presentación de la propuesta del proyecto se establecieron los siguientes alcances y limitaciones:

- Revisar el estado del arte y escoger una topología de diseño apropiada para un equipo generador trifásico de hundimientos de voltaje tipo SAG/DIP e interrupciones de corta duración de voltaje, entre los generadores basados en: maquinas diesel-generador síncrono, basados en impedancias shunt, transformador, autotransformador, y convertidores electrónicos de potencia. Teniendo en cuenta no solo las consideraciones técnicas sino también las limitaciones de costo.
- El diseño del generador se realizara modular, flexible y escalable. Modular para probar con facilidad el funcionamiento y verificar los diseños de cada etapa del generador, Flexible y escalable para poder construir el prototipo de generador en función de los recursos económicos.
- Teniendo en cuenta la posibilidad de futuras fuentes de financiación a través del proyecto "Implementación de un Laboratorio para evaluación Normalizada y análisis

del efecto de perturbaciones de Calidad de Potencia" presentado a COLCIENCIAS, y la convocatoria "Apoyo de la DIB a tesis de investigación en posgrados". Si los recursos económicos resultan suficientes se construirán las cantidades suficientes de módulos de cada etapa, se integraran y se probara en su totalidad el generador trifásico de variaciones de voltaje AC. En el caso que los recursos sean limitados se construirá una cantidad de módulos suficiente para probar la integración en un prototipo de generador con prestaciones limitadas.

- En el diseño se tendrán en cuenta consideraciones de compatibilidad electromagnética, seguridad eléctrica y protecciones eléctricas. Adicionalmente, el generador deberá ser plenamente compatible con la carga (EUT).
- La especificación de potencia y corriente de salida del generador trifásico de variaciones de voltaje en el rango de corriente de 16-50 Amperios puede cambiar dependiendo del costo y la financiación. Esto es posible dado que la norma IEC 61000-4-11 considera las mismas especificaciones de profundidad y duración de los DIP's/SAG's, e interrupciones cortas, para realizar pruebas de inmunidad de variaciones de tensión para equipos conectados a fuentes y redes de alimentación de bajo voltaje AC pero en el rango de corriente menor igual a 16 Amp.
- El diseño del módulo del sistema de control para el generador debe permitir la programación de las pruebas de inmunidad y para ello reconfigurar las señales de control de los dispositivos de la etapa de potencia del generador de variaciones de voltaje AC. Adicionalmente, el módulo de control debe registrar y almacenar la información de las señales del equipo en prueba (EUT) obtenidas del módulo de sistema de medición e instrumentación en una prueba. Para ello se diseñara un sistema embebido y plataforma de hardware para este fin.
- Para el diseño del módulo del sistema de medición e instrumentación que permita la adquisición y el acondicionamiento de las señales de voltaje y corriente. Se utilizaran los elementos sensores más adecuados, para el acondicionamiento de señales se desarrollara hardware, y para la adquisición y conversión A/D de las señales se utilizara plataformas existentes como tarjetas de adquisición.
- Para el diseño del módulo de la interfaz HMI, que esta permita visualizar y registrar la información de las señales obtenidas del equipo en prueba (EUT).Se propone utilizar plataformas de software existentes que se adecuen a la aplicación.
- Entrega del manual de funcionamiento y de mantenimiento del generador.
- Recomendaciones acerca de su operación segura

El primer capítulo de este libro trata de las perturbaciones en sistemas de energía eléctrica introducidas por los procesos de producción, transporte, distribución y consumo de la energía eléctrica. En donde los estándares definen específicamente los siguientes tipos de perturbaciones: Variaciones de tensión y corriente de corta duración, Variaciones de tensión y corriente de larga duración, Desbalances de tensión, y Fluctuaciones de Tensión. Dentro de los tipos anteriores de perturbaciones se trata con mayor énfasis los hundimientos, e interrupciones de tensión, puesto que estas dos son el propósito de la construcción del generador de perturbaciones originalmente planteado. Las perturbaciones se clasifican por eventos de tensión, determinados por su magnitud y duración, lo que suministra información muy útil para evaluar la inmunidad de un equipo.

En el primer capítulo también se investigan y estudian las normas y/o estándares internacionales sobre compatibilidad electromagnética y las pruebas de inmunidad de equipos, cuyo propósito es definir la calidad de la energía eléctrica a través de la definición de los márgenes de los valores eficaces, frecuencia, distorsión, fluctuaciones y desbalances. Se definen los requerimientos de magnitud del evento y su duración en la prueba de inmunidad de equipos y se hace una clasificación de las normas y pruebas de inmunidad según el tipo de perturbación. Esto como condición inicial para especificar y diseñar el generador de perturbaciones de tensión, finalmente se establecen las especificaciones y criterios de diseño del generador trifásico de perturbaciones.

El segundo capítulo estudia las diferentes topologías aplicadas para la construcción de generadores de perturbaciones de tensión, teniendo en cuenta que el propósito del equipo es la generación monofásica y trifásica de hundimientos, e interrupciones de tensión. Las topologías estudiadas son: Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador o auto-transformador por conmutación de taps, Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie, Generador de perturbaciones de tensión basado en reactor controlado por tiristor por conmutación de impedancia en paralelo, Generador de perturbaciones de tensión basado en convertidor conmutado o amplificador de potencia. Se realiza una comparación y evaluación de cada una de estas topologías, basada en las siguientes características: robustez, simplicidad, costo y versatilidad (aplicabilidad en la generación de diferentes tipos de perturbaciones), y con ello se determina la topología más apropiada para la implementación del generador

trifásico de perturbaciones de tensión. Finalmente se determina la metodología para el diseño y desarrollo del equipo generador de perturbaciones.

El tercer capítulo trata de la arquitectura del generador de perturbaciones, basada en la topología escogida: Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador por conmutación de taps. La arquitectura planteada busca que el diseño del generador cumpla las normas IEC 61000-4-11 [7], IEC 61000-4-34 [8], y adicionalmente, que pueda ser usado en la realización de pruebas de inmunidad SEMI F47 [10], ITIC [11] y CBEMA [9]. La arquitectura plantea un diseño modular, cuyas etapas principales son: Etapa de potencia de interruptores bidireccionales, transformador trifásico Zig-Zag, módulos de medición y acondicionamiento de señales, y Control e interfaz HMI. En la segunda parte del capítulo se hace un desarrollo del proceso de diseño, implementación y prueba de los módulos de potencia del generador de perturbaciones, los cuales son: los módulos de potencia de interruptores bidireccionales IGBT y el transformador trifásico Zig-Zag.

En el cuarto capítulo se hace un desarrollo del proceso de diseño e implementación del sistema de control e interfaz HMI-GUI, y de los módulos de instrumentación de señales de corriente y voltaje. La plataforma de procesamiento del sistema de control está dividida funcionalmente en dos módulos: El primer módulo es un control de secuencia de disparo de los interruptores de potencia basado en Arduino (microcontrolado), y el segundo módulo está basado en un computador (PC) que soporta la interfaz HMI-GUI desarrollada/programada en el software labview. A su vez el sistema de control requiere no solo de las plataformas de procesamiento, sino que también requiere de la integración de módulos auxiliares como son el módulo de sincronismo con la red, el módulo de acondicionamiento de señales digitales de control, y la tarjeta de adquisición de señales DAQ.

El quinto capítulo presenta los resultados de las pruebas realizadas con el generador trifásico de perturbaciones de tensión. El capítulo inicia indicando cual es el protocolo de prueba apropiado y seguro para la operación y uso de equipo generador. Luego se presentan los montajes y resultados de las pruebas de funcionamiento, el propósito de esta pruebas es demostrar que el equipo generador de perturbaciones puede realizar hundimientos e interrupciones de tensión monofásicas y trifásicas, de acuerdo a las normas IEC 61000-4-11 [7] IEC 61000-4-34 [8].

En cuanto a las perturbaciones trifásicas se demuestra que el generador puede producir hundimientos de tensión simétricos, asimétricos, y asimétricos desbalanceados. También se demuestra que el equipo puede producir hundimientos, interrupciones y elevaciones de tensión de acuerdo a las pruebas de inmunidad SEMI F47 [10], ITIC [11] y CBEMA [9]. Adicionalmente, el equipo puede producir fluctuaciones de tensión (Flicker), aunque estas no cumplen con exactitud ninguna norma. En la segunda parte del capítulo se presenta los resultados de pruebas de inmunidad basadas en la norma IEC 61000-4-11 [7], la primera prueba de inmunidad se aplicó sobre bombillas fluorescentes compactas, y la segunda prueba de inmunidad a un motor AC trifásico de inducción. En este capítulo no solo se demuestra la aplicabilidad del equipo y el cumplimiento de las normas deseadas, sino que también demuestra la capacidad del equipo en la presentación de los datos gráficamente durante la prueba, y la capacidad de registro/almacenamiento de los datos y el posterior procesamiento de la información.

En el sexto capítulo se presentan las conclusiones del proyecto derivadas del desarrollo y análisis de resultados del generador de perturbaciones. En esta se demuestra como el equipo da efectivamente respuesta a los objetivos y propósitos planteados. A su vez se reflexiona sobre las perspectivas de investigación resultantes como consecuencia de la disponibilidad del equipo. Finalmente se plantean algunas recomendaciones derivadas de las características actuales del equipo y que pueden resultar en mejoras de las funcionalidades del mismo.

# 1. Perturbaciones Electromagnéticas en Calidad de Energía

La calidad de la energía eléctrica o calidad de potencia hace referencia a la combinación de calidad de voltaje y calidad de corriente, donde la falta de calidad representa la desviación de las formas de onda y magnitudes del voltaje y de la corriente de su ideal. A estas desviaciones se les denomina perturbaciones, la perturbación de las formas de onda de voltaje y corriente se introduce en los procesos de producción, transporte, distribución y consumo de la energía eléctrica [14].

Definir los límites permisibles para la variación de los parámetros de la calidad de la fuente de energía eléctrica ha motivado el desarrollo de los estándares de calidad de potencia. En ellos se definen los márgenes máximos de variación de la magnitud del voltaje, frecuencia, limitación de armónicos en la corriente, distorsión de voltaje, fluctuaciones del voltaje, y duración de interrupciones [14].

La calidad del servicio hace referencia a la interacción entre quien suministra la energía y quien la consume, incluyendo aspectos que involucran al consumidor y que típicamente afectan la forma de onda de la corriente. De tal forma que al incluir al consumidor resulta mucho mejor usar el término Compatibilidad Electromagnética (EMC) [15], puesto que este involucra la interacción mutua entre la fuente y el consumidor, y es ampliamente usado en textos, en normas nacionales y en normas internacionales [14].

El concepto de Compatibilidad Electromagnética (EMC) introduce dos elementos importantes para describir los efectos de las perturbaciones, estos son: emisión e inmunidad. La emisión hace referencia a la contaminación producida por un equipo, y la inmunidad hace referencia a la habilidad de un equipo de funcionar en un ambiente con contaminación electromagnética [14] [15].

---

Los ambientes electromagnéticos pueden estudiarse y clasificarse según la norma IEC 61000-2-4, [16] que tiene en cuenta tres categorías básicas:

- **CLASE 1:**

Esta clase se relaciona con el uso de equipo muy sensible a las perturbaciones en la fuente de alimentación, por ejemplo, la instrumentación de laboratorio, algunos equipos de automatización, algunos equipos de cómputo, etc. Ambientes de clase 1 requieren normalmente equipos de protección, como sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS), reguladores, filtros o supresores de Aumentos de tensión.

- **CLASE 2:**

Esta clase aplica generalmente para PCC's (puntos de conexión común) y para IPC's (puntos de conexión en la planta en ambientes industriales) y otras fuentes de alimentación diferentes a la red pública. Los niveles de compatibilidad de esta clase son idénticos a los de las redes públicas, por lo tanto los componentes diseñados para su aplicación en redes públicas pueden ser utilizados en esta clase de entorno industrial.

- **CLASE 3:**

Esta clase sólo aplica para IPC's en ambientes industriales. Esta clase tiene niveles de compatibilidad más altos que los de la clase 2 para algunas perturbaciones. Por ejemplo, esta clase debe ser considerada cuando se cumpla alguna de las condiciones siguientes: cuando la mayoría de las cargas que se alimentan lo hacen a través de convertidores de potencia, cuando se tienen máquinas de soldadura, cuando grandes motores se ponen en marcha con frecuencia, y cuando se tienen cargas que varían rápidamente.

## 1.1 Tipos de Perturbaciones Electromagnéticas

Las perturbaciones electromagnéticas están definidas y clasificadas en los estándares IEC-61000-1-1, IEEE 1159, NTC 5001 [12] [14] [15] [6]. Esta clasificación obedece a parámetros como magnitud, espectro de frecuencia, forma de onda, duración y/o continuidad. En siete tipos:

- Transitorios electromagnéticos (TEM)
- Variaciones de tensión y corriente de corta duración (VTCD – CTCD)
- Variaciones de tensión y corriente de larga duración (VTLD – CTLD)
- Desbalances de tensión (DT)
- Distorsión de forma de onda de señal de voltaje y corriente (DF)
- Fluctuaciones de Tensión (FT)
- Variaciones de corta duración de la frecuencia (VF)

### 1.1.1 Transitorios electromagnéticos (TEM)

Son fenómenos muy rápidos y momentáneos en la tensión, estos pueden ser impulsos de muy corta duración u oscilaciones. En la Tabla 1-1 se presentan los valores típicos y clasificación de estos eventos [12] [14].

**Tabla 1-1:** Clasificación de los transitorios electromagnéticos [12].

CATEGORIAS DE TRANSITORIOS	CONTENIDO ESPECTRAL (VALORES TIPICOS)	DURACION (VALORES TIPICOS)	MAGNITUD DEL VOLTAJE (VALORES TIPICOS)
<b>IMPULSOS</b>			
Nanosegundos	5 nseg de elevación	<50 nseg	
Microsegundos	1 useg de elevación	50nseg – 1 mseg	
Milisegundos	0,1 mseg de elevación	> 1 mseg	
<b>OSCILATORIOS</b>			
Baja frecuencia	< 50 Khz	0,3 – 50 mseg	0 – 4 pu*
Media Frecuencia	5 – 500 Khz	20 useg	0 – 8 pu*
Alta frecuencia	0,5 – 5 Mhz	5 useg	0 – 4 pu*

\*(pu) "por unidad" referenciada la magnitud nominal (1 pu = 100% de la magnitud nominal)

### 1.1.2 Variaciones de tensión y corriente de corta duración

Este tipo de perturbaciones se clasifican dependiendo de su duración en instantáneas, momentáneas y temporales. Así mismo se clasifican dependiendo de la magnitud del evento. Si el evento puede describirse como una caída en la magnitud de la tensión se denomina hundimiento de tensión (SAG/DIP).

**Tabla 1-2:** Clasificación de las variaciones de corta duración [12].

CATEGORIAS DE LAS VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN	DURACION (VALORES TÍPICOS)	MAGNITUD DEL VOLTAJE (VALORES TÍPICOS)
<b>INSTANTANEAS</b>		
SAG (Hundimiento)	0,5 – 30 Ciclos	0,1 – 0,9 pu*
SWELL (Aumento)	0,5 – 30 Ciclos	1,1 – 1,8 pu*
<b>MOMENTANEAS</b>		
SAG (Hundimiento)	30 Ciclos – 3 Seg	0,1 – 0,9 pu*
SWELL (Aumento)	30 Ciclos – 3 Seg	1,1 – 1,4 pu*
INTERRUPCIÓN	0,5 – 3 Ciclos	< 0,1 pu*
<b>TEMPORALES</b>		
SAG (Hundimiento)	3 Seg – 1 min	0,1 – 0,9 pu*
SWELL (Aumento)	3 Seg – 1 min	1,1 – 1,2 pu*
INTERRUPCIÓN	3 Seg – 1 min	< 0,1 pu*

\*(pu) "Por Unidad" referenciada a la magnitud nominal (1 pu = 100% de la magnitud nominal)

Si el evento puede describirse como una pérdida completa de la tensión se denomina interrupción. Si el evento se puede describir como un incremento en la magnitud de la tensión se denomina aumento de tensión (Swell). En la Tabla 1-2 se muestra esta clasificación con sus valores típicos según la norma IEEE 1159 [12].

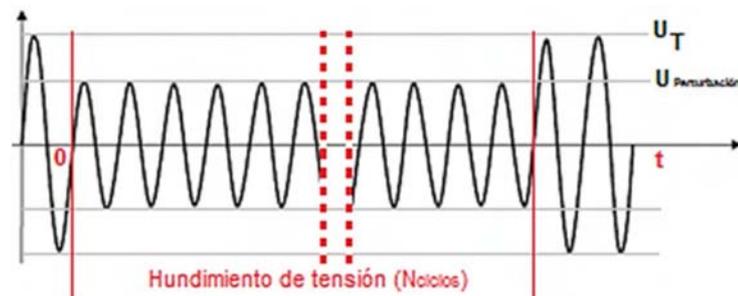
Este tipo de perturbaciones tienen su origen en la conexión y desconexión de grandes cargas, condiciones de falla y/o problemas por conexiones sueltas en cables de potencia. Su duración dependerá del evento que la produce y de la respuesta de los sistemas de protección [14].

### 1.1.3 Hundimientos de tensión, SAG/DIP

Esta perturbación es una disminución del valor eficaz de la tensión entre 0,1 y 0,9 pu, con respecto al valor nominal RMS de la tensión del sistema. Con una duración entre 0,5 ciclos y 1 minuto. La frecuencia permanece igual. Este fenómeno es producido por la conexión de grandes cargas, el arranque de motores, energización de transformadores, fallas en el sistema de potencia, etc... [12] [14].

En la norma colombiana NTC - 5001 el hundimiento se describe como una disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado, entre el 90% y el 10% de la tensión declarada  $V_c$  seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Esta variación de corta duración dura entre medio ciclo a 1 min [6]. En la Figura 1-1 se presenta un hundimiento de tensión con una caída en magnitud del 30%, lo que significa que la tensión es equivalente a 0,7pu.

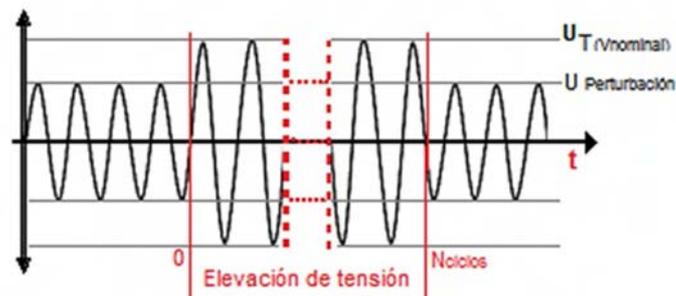
**Figura 1-1:** Hundimiento de tensión, SAG/DIP. [7]



**Nota:** La figura presenta un hundimiento de voltaje que disminuye a 70% (0,7 pu) durante 25 períodos a partir del cruce por cero.

### 1.1.4 Elevaciones de tensión, SWELL

Esta perturbación es un aumento en el valor eficaz de la tensión, entre 1,1 pu y 1,8 pu con respecto al valor nominal RMS de la tensión del sistema. Con una duración entre 0,5 ciclos y 1 minuto. La frecuencia permanece igual.

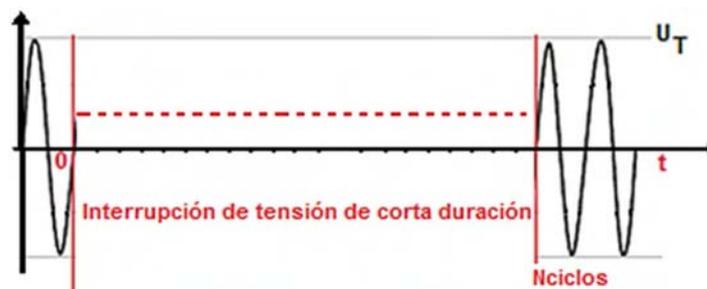
**Figura 1-2:** Elevación de tensión, SWELL [15].

**Nota:** La figura presenta una elevación de voltaje, la cual alcanza el 130% (1,3pu) durante 25 períodos. A partir del cruce por cero.

Normalmente este fenómeno es producido por la elevación del voltaje temporal sobre las fases No-falladas durante una falla fase-tierra, por la apertura de grandes cargas, por la energización de bancos de condensadores, etc. Este a su vez es condicionado por la localización de la falla, la impedancia del sistema y la puesta a tierra. En la Figura 1-2 se presenta un ejemplo de una elevación de tensión de un 30% durante 25 ciclos [12] [14].

### 1.1.5 Interrupciones o pérdidas completas de Tensión

Esta perturbación es una disminución del valor eficaz de la tensión a menos de un 10% o 0,1pu del valor nominal, y durante un periodo no mayor a 1 minuto. Estas son debidas a fallas en el sistema de potencia, fallas en los equipos, fallas en la operación, etc. Su duración depende del tiempo de operación de los equipos de protección y control [12].

**Figura 1-3:** Interrupción de tensión [15].

**Nota:** La figura presenta un decremento total del voltaje, que disminuye a 0% (0,0 pu) durante 25 períodos.

### 1.1.6 Variaciones de tensión y corriente de larga duración

Estas variaciones hacen referencia a los mismos fenómenos anteriores de elevaciones de tensión (SWELL), hundimientos de tensión (SAG/DIP), e interrupciones pero su duración es mayor a 1 minuto, típicamente hasta 5 minutos.

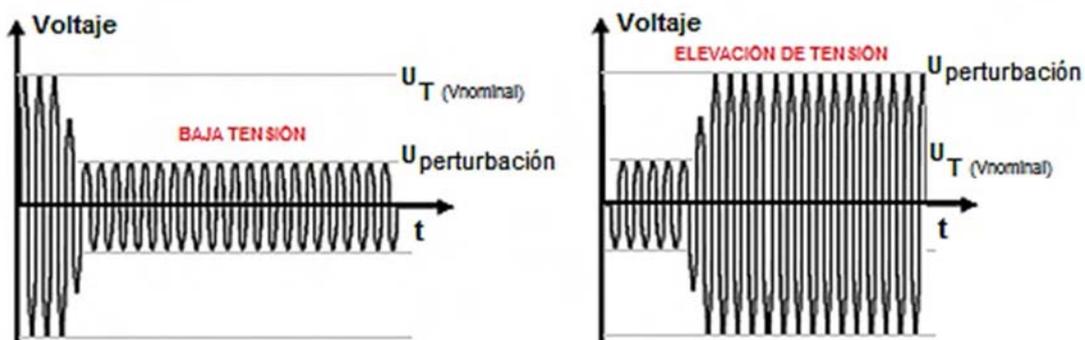
**Tabla 1-3:** Clasificación de las variaciones de larga duración [10].

CATEGORIAS DE LAS VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN	CONTENIDO ESPECTRAL (VALORES TÍPICOS)	DURACION (VALORES TÍPICOS)	MAGNITUD DEL VOLTAJE (VALORES TÍPICOS)
Bajo Voltaje		1 min >	0,8 – 0,9 pu*
Sobretensión		1 min >	1,1 – 1,2 pu*
Interrupción Sostenida		1 min >	0,0 pu*

**Nota:** Típicamente su duración es mayor a 1 minuto y menor a 5 minutos. (pu\* = por unidad).

Normalmente no son debidas a fallos en el sistema de potencia, si no que se presentan como consecuencia de variaciones en la carga del sistema, conexión y desconexión de condensadores, sobrecargas, mala posición en el conmutador de un transformador y operaciones de maniobra del sistema de potencia. En la Tabla 1-3 se presenta su clasificación según la norma IEEE 1159 [12] [14] y en las Figura 1-4 se representa gráficamente un par de ejemplos.

**Figura 1-4:** Variación de tensión de larga duración: Bajo Voltaje y Sobre voltaje [17].



### 1.1.7 Desbalances de tensión o corriente

Este es un fenómeno presente en sistemas trifásicos, ocurre cuando los valores RMS de los voltajes o los ángulos entre cada una de las fases no son iguales. La severidad del desbalance en un sistema trifásico puede expresarse de varias maneras, tales como:

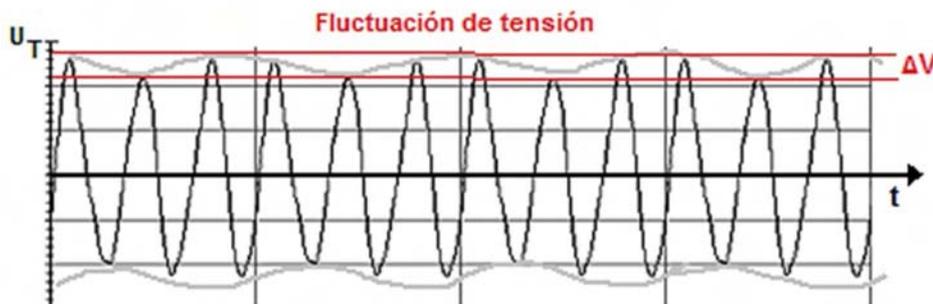
- La relación entre la componente de secuencia negativa y la componente de secuencia positiva [14].
- La relación determinada por la diferencia de las magnitudes de las fases mayor y menor, sobre el promedio de magnitud de las tres fases [14].
- La mayor diferencia entre las magnitudes mayor y menor de fases consecutivas [14].

Los anteriores indicadores hacen referencia a desbalances de secuencia negativa, desbalances de magnitud, y desbalances de fase. Estos son producidos por cargas desequilibradas o por conexión de cargas a una sola fase, y típicamente con valores entre 0,5% y 2% [12] [14].

### 1.1.8 Fluctuaciones de Voltaje (Flickers)

Las fluctuaciones de tensión son variaciones en la magnitud, se producen como consecuencia de variaciones en el flujo de potencia hacia un equipo.

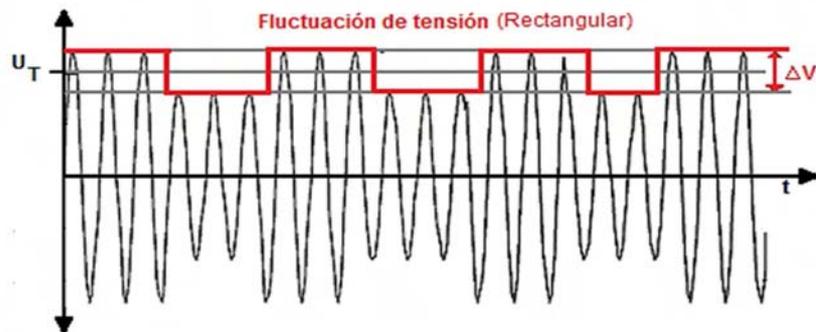
**Figura 1-5:** Fluctuación de tensión (Flicker) [12].



**Nota:** norma IEEE 1159.

Normalmente se presentan como cambios pequeños y rápidos en la magnitud o el valor RMS, los cuales en la mayoría de equipos no producen mayor efecto [12] [16]. Pero, si su duración es suficiente y la variación corresponde a un rango crítico de frecuencias podría afectar el equipo.

**Figura 1-6:** Fluctuación de tensión rectangular (Flicker) [13].

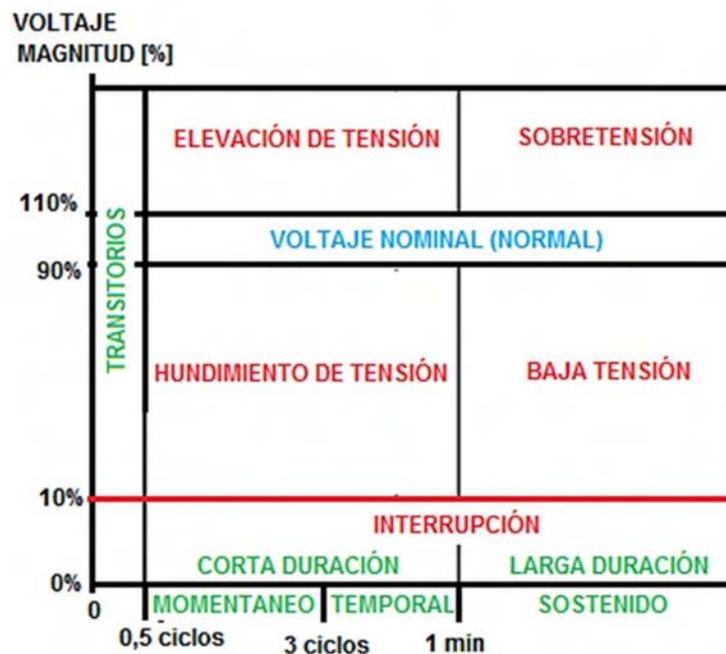


**Nota:** Norma IEC 61000-4-15.

Un ejemplo son las bombillas o cargas de iluminación en cuyo caso si la variación produce con frecuencias entre 1 Hz y 10Hz y su duración es mayor a 0,1 seg el ojo humano puede percibir esto como una emisión cambiante de luz. Precisamente este efecto es el que en la norma IEC 61000-3-3 [18] describe la fluctuación (Flicker) como la Impresión de inestabilidad de la sensación visual inducida por un estímulo luminoso cuya luminancia o distribución espectral fluctúa con el tiempo.

### 1.1.9 Eventos de la magnitud de voltaje

En el estudio de las perturbaciones de tensión es muy útil usar la clasificación por eventos del voltaje, teniendo en cuenta su magnitud y duración. Esto permite obtener una gran cantidad de información sobre la calidad de la energía. En la Figura 1-7 se presenta la clasificación de eventos de acuerdo a la norma IEEE-1159 [12] [14]. Se define un evento de voltaje como un cambio significativo de la magnitud del voltaje nominal por una duración limitada. Es típico expresar la magnitud en términos del valor eficaz del voltaje nominal y la duración en múltiplos de un ciclo o medio ciclo de la frecuencia del sistema de potencia [14].

**Figura 1-7:** Eventos de magnitud de voltaje, norma IEEE 1159 [12].

Se debe tener en cuenta que si durante el evento la magnitud de la tensión en valor eficaz no es constante, existen ambigüedades en la definición de magnitud del evento. Inclusive, esto podría dificultar la determinación de la duración del evento. Existen eventos muy rápidos cuya duración es inferior a un ciclo, y que no pueden ser caracterizados dado que la estimación de su magnitud y duración resulta ser irreal.

Eventos repetitivos pueden producir información errónea, típicamente un sobreestimación del número de eventos, o subestimar la severidad del evento. Adicionalmente, algunos equipos son sensibles a otras características diferentes de la magnitud y la duración.

Para el estudio de la calidad de la energía eléctrica es necesario definir las características nominales de un sistema de potencia (Voltaje eficaz, frecuencia, etc...), y definir los problemas de calidad de energía y limitarlos. Esto es exactamente lo que determino el desarrollo de estándares de calidad de potencia.

## 1.2 Normas y estándares sobre compatibilidad electromagnética y pruebas de inmunidad

El propósito de los estándares es definir la calidad de la energía eléctrica, se entiende por esto; definir los márgenes de variación de los voltajes RMS, frecuencia, distorsiones de forma de onda, fluctuaciones, desbalances, teniendo en cuenta su magnitud y duración [14]. Adicionalmente, también definir los requerimientos de inmunidad que debe cumplir un equipo para que en presencia de estas perturbaciones funcione adecuadamente.

Es importante denotar que los equipos electrónicos son muy sensibles a Los hundimientos de tensión tipo SAG/DIP y niveles bajos de tensión. Así mismo el nivel de inmunidad exigido dependerá de la normatividad acogida por cada país y en algunos casos del medio ambiente eléctrico, diferenciado principalmente por su uso: domestico, industrial, exterior, cubierto, etc.

Las organizaciones IEC, IEEE, y EN tienen normas técnicas sobre calidad de energía, y pruebas de inmunidad de equipos. La norma SEMI-F47 es acogida por la industria de semiconductores, para las pruebas de inmunidad de los equipos electrónicos. La norma ITIC presenta una curva de calidad de energía aceptable para equipos informáticos, nótese que esta norma no está diseñada para toda la industria de productos con semiconductores si no que solo involucra a los equipos informáticos como única área tecnológica. Es importante aclarar que las normas anteriores no entran en conflicto entre sí, más bien son complementarias.

El International Electrotechnical Committee (IEC), ha desarrollado un conjunto de estándares de compatibilidad electromagnética, basándose en la definición de compatibilidad electromagnética como "La habilidad de cualquier dispositivo, equipo o sistema para funcionar de forma satisfactoria en un ambiente electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables sobre cualquier otro elemento de ese ambiente" [14] [15]. También, define el ambiente electromagnético como el nivel de perturbación de la calidad de energía en el cual un equipo no es afectado. A su vez, las perturbaciones se clasifican en conducidas y radiadas.

Las perturbaciones conducidas necesitan un elemento conductor entre el emisor y el receptor. Las perturbaciones radiadas son emitidas o transmitidas desde un equipo a otro sin necesidad de un elemento conductor.

En esta normatividad existen dos aspectos de EMC a considerar:

- Un dispositivo, equipo o sistema, debe ser capaz de operar adecuadamente en ese ambiente electromagnético.
- A su vez, Este dispositivo, equipo o sistema no debe producir demasiada contaminación electromagnética.

Estos dos aspectos definen los términos Inmunidad y Emisión, usados en EMC. Existen estándares para cada uno de ellos, por ejemplo el estándar IEC fija los requerimientos mínimos de inmunidad a los fabricantes para beneficio de los consumidores [14].

Los estándares de inmunidad definen el nivel mínimo de perturbaciones electromagnéticas que un equipo debe ser capaz de soportar. Pero, antes de determinar la inmunidad de un dispositivo, un criterio de desempeño debe ser definido. El criterio más básico y común es si el equipo funciona adecuadamente o falla en el momento de ocurrencia de la perturbación. El estándar de inmunidad IEC-61000-4-1, establece un criterio con cuatro clasificaciones para el desempeño, aplicable a cualquier equipo [19].

- Desempeño normal en los límites especificados.
- Degradación temporal o pérdida de función en presencia de la perturbación, con auto recuperación.
- Degradación temporal o pérdida de función en presencia de la perturbación, que requiere intervención del operador o de reposición del sistema para su recuperación.
- Degradación o pérdida de la función, que no es recuperable debido a los daños producidos en el equipo, o componentes, o software, o pérdida de datos.

Al determinar el desempeño de un equipo frente a las perturbaciones de la energía eléctrica primero se debe tener en cuenta el tipo de perturbación, por ejemplo, los Hundimientos de tensión (SAG/DIP), Aumentos de tensión (Swell), Interrupciones de corta y larga duración, y Fluctuaciones de tensión (Flicker), etc.. Y segundo, se debe

tener en cuenta que estos eventos se producen estocásticamente y con diferentes valores de magnitud y duración. Esto quiere decir que un equipo puede ser más o menos inmune a un tipo de perturbación que a otra. Por lo tanto existen diferentes estándares EMC que trabajan las diferentes características de los tipos de eventos o perturbaciones, específicamente los niveles de prueba, duración, y los criterios para determinar el cumplimiento de un equipo o un sistema.

Existen estándares que especifican y describen las técnicas de ensayo y medición para pruebas de inmunidad de equipos sometidos a perturbaciones como Hundimientos de tensión, interrupciones y variaciones de tensión. Específicamente en el estándar IEC se tienen las normas IEC-61000-4-11 [7], IEC-61000-4-34 [8]. Estas normas se diferencian entre sí, porque la norma IEC-61000-4-11 [7] se especifica para pruebas de inmunidad en equipos de baja tensión monofásicas o trifásicas con corrientes de entrada por fase menores a 16 Amperios, y la norma IEC-61000-4-34 [8] para equipos con corrientes de entrada mayores a 16 Amperios por fase. También existen otros estándares aplicables a los mismos eventos como el estándar EN-50160 [20] y el estándar IEEE-1159-2009 [12] que hace una descripción categorizada de estos eventos. Las curvas de inmunidad ITC, CBEMA, y SEMIF47 [9], también son aplicables para pruebas de inmunidad de equipos sometidos a estos eventos, teniendo en cuenta que ninguna determina o especifica valores exactos de los niveles y duración de los eventos de sobretensión, si no intervalos.

Las normas IEC-61000-3-3 [18], IEC-61000-3-5 [21], IEC-61000-3-11 [22], IEC-61000-3-14 [22], especifican y describen las técnicas de ensayo y medición para pruebas de inmunidad de equipos de baja tensión sometidos a perturbaciones como las fluctuaciones de tensión. Mientras que la norma IEC-61000-4-15 [13] describe las especificaciones de diseño y funcionalidades de un instrumento medidor de fluctuaciones de tensión.

En cuanto a las elevaciones de tensión de corta y larga duración (Sobretensiones) el estándar IEC en su norma IEC-61000-4-30 [23] describe los parámetros de un evento de sobretensión, con un enfoque más claro hacia la detección y evaluación, y más vago hacia la prueba de inmunidad de equipos. Por esta razón es recomendable tener en cuenta el uso de normas adicionales como la norma EN-50160 [20] y la norma IEEE 1159 [12], aunque estas no coincidan plenamente.

Para el desarrollo de pruebas de inmunidad de equipos sometidos a aumentos de tensión es incluso mejor utilizar las curvas de inmunidad ITC, CBEMA, y SEMIF47, [9] y tener en cuenta que ninguna determina o especifica valores exactos de los niveles y duración de los eventos de sobretensión, si no intervalos.

Teniendo en cuenta lo anterior, en Tabla 1-4 se propone una clasificación apropiada para uso de estas normas, en cuanto al estudio, medición, y prueba de las perturbaciones de interés en este trabajo. Con la finalidad de proveer un marco referencial para obtener las mejores características deseables para la construcción de un generador de perturbaciones.

**Tabla 1-4:** Propuesta de clasificación de los estándares y pruebas De inmunidad, para la construcción de un generador de perturbaciones por tipo de perturbación.

TIPO DE PERTURBACIÓN	ESTÁNDAR EMC	PRUEBA DE INMUNIDAD
Hundimiento de tensión SAG/DIP E Interrupciones de corta duración.	IEC 61000-4-11	ITIC
	IEC 61000-4-34	CBEMA
	IEEE 1159-2009 (Rev. IEEE std 1159-1995)	SEMI-F47
	EN 50160	SEMI-F42
Aumentos de tensión y Swell	IEEE 1159-2009 (Rev. IEEE std 1159-1995)	ITIC
	EN 50160	CBEMA
	IEC 61000-4-30	
Fluctuaciones de tensión Flickers	IEC 61000-3-3	
	IEC 61000-3-11	
	IEC 61000-4-14	
	IEC 61000-4-15	

### 1.3 Especificaciones para el generador trifásico de perturbaciones

Teniendo en cuenta las normas y pruebas de inmunidad consignadas en la Tabla 1-4, es posible determinar las especificaciones necesarias para diseñar el generador trifásico de perturbaciones de tensión. Dentro de esta investigación y análisis se pueden diferenciar especificaciones básicas para producir hundimientos e interrupciones de tensión, de algunas especificaciones opcionales con la finalidad de aprovechar el generador para producir la mayor cantidad de tipos de perturbaciones de tensión.

Las especificaciones básicas para producir hundimientos e interrupciones de tensión según el objetivo general y los objetivos específicos de esta Tesis, se obtienen a partir del análisis de las normas IEC 61000-4-11 [7], IEC 61000-4-34 [8], y las pruebas de inmunidad basadas en las curvas SEMI F47 [9] [10] e ITIC (CBEMA) [11]. A estas especificaciones básicas se les clasifica como “obligatorias”, esto implica que deben tener en cuenta en el diseño y desarrollo del equipo generador.

A si mismo existen especificaciones encontradas en el análisis de las normas IEC 61000-4-11 [7], IEC 61000-4-34 [8], y las pruebas de inmunidad basadas en las curvas SEMI F47 [9] [10] e ITIC (CBEMA) [11], que se mencionan en dichas normas como opcionales. Estas serán tenidas en cuenta en el diseño y desarrollo del equipo generador, sin que esto implique su cumplimiento.

En cuanto a las normas IEEE 1159 [12], EN 50160 [20], IEC 61000-4-30 [23], IEC 61000-3-3 [18], IEC 61000-3-11 [22], IEC 61000-4-14 [24], IEC 61000-4-15 [13], estas se analizaron con el fin de mejorar el diseño y desempeño del generador de perturbaciones. En el análisis de estas normas se hallaron especificaciones y valores compatibles, adicionalmente se encontraron especificaciones opcionales, que pueden ser tenidas en cuenta para el diseño y desarrollo del equipo generador, sin que esto implique su cumplimiento. Finalmente se encontraron algunas especificaciones que no son compatibles con el generador, específicamente las relacionadas con fenómenos transitorios rápidos y con niveles de tensión muy pequeños (variaciones menores a 5%).

**Tabla 1-5-A: Análisis:** Especificaciones para el generador trifásico de perturbaciones de tensión (PARTE A).

CARACTERÍSTICA	VALOR ESPECIFICADO	CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS	NORMATIVIDAD / PRUEBAS DE INMUNIDAD	OBSERVACIÓN
Voltaje nominal ( $U_T$ )	100%	Tolerancia: $\pm 5\%$	IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34, IEEE 1159, EN 50160, IEC 61000-4-30, IEC 61000-3-3, IEC 61000-3-11, IEC 61000-4-14, IEC 61000-4-15, CBEMA, ITIC, SEMI-F47 (SEMI-F42)	Obligatorio (algunas normas determinan como tolerancia del valor $U_T$ : $\pm 10\%$ )
Voltajes de prueba (perturbación): hundimientos e interrupciones	0%, 40%, 70%, 80%	Tolerancia: $\pm 5\%$ Tolerancia: $\pm 5\%$ Tolerancia: $\pm 5\%$ Tolerancia: $\pm 5\%$	IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34, IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34, IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34, IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34	Obligatorio Obligatorio Obligatorio Obligatorio
	0% 1% 40% 50% 70% 80% 90%	Tolerancia: $\pm 5\%$ <b>Tolerancia: <math>\pm 5\%</math></b> Tolerancia: $\pm 5\%$ Tolerancia: $\pm 5\%$ Tolerancia: $\pm 5\%$ Tolerancia: $\pm 5\%$	EN 50160, ITIC, SEMI-F47 <b>EN 50160</b> EN 50160, ITIC, SEMI-F47 EN 50160, ITIC, SEMI-F47 ITIC, SEMI-F47 EN 50160, ITIC, SEMI-F47	Compatible <b>No-Compatible</b> Compatible Compatible Compatible Compatible
	0% <10% 10%-90%		IEEE-1159, IEC 61000-4-30, CBEMA IEEE-1159 IEEE-1159, IEC 61000-4-30, CBEMA	Compatible Compatible Compatible
	100%-200% 110%-180%		IEC 61000-4-30, CBEMA IEEE-1159	Compatible Compatible
	110% 120% 140% 200%		ITIC, ITIC, ITIC, ITIC,	Compatible Compatible Compatible Compatible
Voltajes de prueba (perturbación): Elevación de tensión	$\pm 0,1\% - \pm 7\%$	Igual a 0-20Pst	IEEE-1159, IEC 61000-4-30, IEC 61000-3-3, IEC 61000-3-11	Compatible solo para 5%
	$\pm 8\%$ $\pm 12\%$		IEC 61000-4-14	Compatible solo con 5%, y 10/%
	<b>0,33-2,457%</b> <b>0,25-1,072%</b>	Fluctuación tipo senoidal Fluctuación tipo rectangular	<b>IEC 61000-4-15</b> <b>IEC 61000-4-15</b>	<b>No compatible</b> <b>No compatible</b>
	40%	Calibración-flickermeter	IEC 61000-4-15	Compatible
Duración de la perturbación: [Ciclos],[segundos],[minutos]	0,5 c 1 c 12 c 30 c 300 c		IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34,	Obligatorio Obligatorio Obligatorio Obligatorio Obligatorio
	0,5 - 30 c 30c - 3seg 3seg-1min >1min 3min >3min		IEEE-1159, EN 50160 IEEE-1159, EN 50160 IEEE-1159, EN 50160 IEEE-1159 EN 50160 EN 50160	Compatible Opcional Opcional Opcional Opcional
	0,5c - 1000c		CBEMA	Compatible
	0-16 0-20 0-23 0-40	A 100% $U_T$ , A 80% $U_T$ , (5seg) A 70% $U_T$ , (3seg) A 40% $U_T$ , (3seg)	IEC 61000-4-11, IEC 61000-3-3 IEC 61000-4-11 IEC 61000-4-11 IEC 61000-4-11	Obligatorio Obligatorio Obligatorio Obligatorio
Capacidad de corriente de salida: [A r.m.s]	0-50 50,1-100 > 100	Para 100% de $U_T$ , Para 100% de $U_T$ , Para 100% de $U_T$ ,	IEC 61000-4-34, IEC 61000-3-11 IEC 61000-4-34, IEC 61000-3-11 IEC 61000-4-34	Obligatorio Obligatorio Obligatorio

**Tabla 1-5-B: Análisis:** Especificaciones para el generador trifásico de perturbaciones de tensión (PARTE B).

CARACTERÍSTICA	VALOR ESPECIFICADO	CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS	NORMATIVIDAD / PRUEBAS DE INMUNIDAD	OBSERVACIÓN
Capacidad máxima de corriente instantánea: (inrush peak)	1000 $A_{pico}$ 500 $A_{pico}$ 250 $A_{pico}$	$U_T$ : 250V - 600V $U_T$ : 200V - 240V $U_T$ : 100V - 120V	IEC 61000-4-11 IEC 61000-4-11 IEC 61000-4-11	Opcional Opcional Obligatorio
	1000 $A_{pico}$ 500 $A_{pico}$ 250 $A_{pico}$	$I_{load}$ : 16- 50 A $I_{load}$ : 50,1- 100 A $I_{load}$ > 100 A	IEC 61000-4-34 IEC 61000-4-34 IEC 61000-4-34	Opcional Opcional Obligatorio
Variación instantánea de Voltaje máxima: (overshoot/undershoot)	Menor a 5% de $U_T$		IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34	Obligatorio
	Menor a 6%		IEC 61000-3-11	Compatible
Tiempo de crecimiento y decrecimiento máximo del voltaje: ( $T_r$ y $T_f$ )	Entre: 1 $\mu$ seg y 5 $\mu$ seg	A una carga de 100 $\Omega$	IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34	Obligatorio
Tiempo de observación	1min 5min 10min 15min >15min		IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34, IEEE 1159, EN 50160, IEC 61000-4-30, IEC 61000-3-3, IEC 61000-3-11, IEC 61000-4-14, IEC 61000-4-15, ITIC, CBEMA, SEMI-F47 (SEMI-F42)	Obligatorio Compatible Compatible Compatible
Corrimiento de fase: (OPCIONAL)	0°	OPCIONAL: Entre 0° Y 360°, con pasos de 45°	IEC 61000-4-11	Opcional
		OPCIONAL: Entre 0° Y 360°, con pasos de 5°	IEC 61000-4-34	Opcional
Desfase máximo entre el voltaje de alimentación y la salida del generador:	Menor a $\pm 10^\circ$		IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34	Obligatorio
Control de cruce por cero:	$\pm 10^\circ$		IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34	Obligatorio
Impedancia de Salida: (Recomendada)	0,4 + j0,25 $\Omega$		IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34	Obligatorio

Esto implica que en el diseño e implementación del generador se busca ampliar sus características y especificaciones para dar cumplimiento a un número mayor de normas posibles, esto sin detrimento de las normas y pruebas de inmunidad establecidas como obligatorias en los objetivos. En algunos casos estas características ampliadas no cumplirán la totalidad de una norma, aunque si una función didáctica y educativa. En las Tablas 1-5-A y 1-5-B se presenta la combinación de las características y especificaciones obtenidas, y su evaluación como: Obligatorias, Compatibles (con las obligatorias), Opcionales (características ampliadas), y No-compatibles.

## RESUMEN CAPITULO

En este capítulo se hizo una revisión de los conceptos relacionados con Calidad de la energía, Compatibilidad Electromagnética, y su normatividad. De acuerdo a esta normatividad se obtuvo una clasificación para los ambientes electromagnéticos y los límites permitidos para la variación de los parámetros relacionados.

También se hizo una revisión dentro de la normatividad existente para clasificar y definir las perturbaciones en sistemas de energía eléctrica. Se definieron los siguientes tipos de perturbaciones: *Variaciones de tensión y corriente de corta duración*, *Variaciones de tensión y corriente de larga duración*, *Desbalances de tensión*, y *Fluctuaciones de Tensión*.

Relacionando la revisión de las perturbaciones en este capítulo con los elementos aportados en la introducción del presente libro, se concluye que los hundimientos de tensión son fenómenos más importantes, puesto que son los de mayor ocurrencia. (*Una interrupción puede entenderse como un hundimiento de magnitud 0%*).

Se encuentra que una manera muy apropiada de analizar las perturbaciones, es utilizar la clasifican por eventos de tensión, determinados por su magnitud y duración. Lo que permite la realización de "Pruebas de Inmunidad", con el fin de obtener información muy útil para evaluar la inmunidad de un equipo en un ambiente electromagnético.

Analizando toda la información, se desea que el equipo generador trifásico de perturbaciones de tensión no solo realice hundimientos e interrupciones de corta duración (*Objetivo Principal*), si no que en la medida de lo posible este permita producir otros eventos afines, para que su aporte en la evaluación de inmunidad sea mayor. Se propone entonces, que se analice en el diseño la viabilidad para producir adicionalmente: elevaciones de tensión (de corta duración), sobretensiones (elevaciones de larga duración), Subtensiones (hundimientos e interrupciones de larga duración). Básicamente se propone que se analice en el diseño la posibilidad de producir eventos momentáneos, temporales y sostenidos, con duraciones desde  $\frac{1}{2}$  Ciclo hasta 5-10 minutos.

En este capítulo se realizó una revisión de las normas y/o estándares internacionales sobre compatibilidad electromagnética, cuyo propósito es definir la calidad de la energía eléctrica a través de la definición de los márgenes de: los valores eficaces, frecuencia, distorsión, fluctuaciones y desbalances. Se analizaron los conceptos de inmunidad y emisión, y la clasificación del desempeño de un equipo en un ambiente electromagnético. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone una clasificación de los estándares y pruebas de inmunidad en función de los tipos de perturbación deseados para el diseño del generador de perturbaciones, esta es presentada en la Tabla 1-4.

Es importante resaltar, que se adicionan las fluctuaciones de tensión a las perturbaciones deseables para tener en cuenta en el diseño de generador de perturbaciones, aunque estas requieren niveles de tensión que no coinciden plenamente con los definidos para hundimientos. Esto implica que en lo referente a la generación de fluctuaciones es posible que el generador no pueda cumplir la normatividad revisada, y en el caso de realizarse su implementación esta sería con fines didácticos.

Se definen los requerimientos de magnitud del evento y su duración, en la prueba de inmunidad de equipos, como condición inicial para especificar y diseñar el generador de perturbaciones de tensión. Se concluye que:

- El generador deberá producir eventos con duraciones de  $\frac{1}{2}$  ciclos, 1 Ciclo, 12 Ciclos, 30 Ciclos, 300 Ciclos, 1 min, 3 min, 5 min y 10 Minutos. (Para sistemas de 60Hz).
- El generador deberá producir eventos con niveles de magnitud de 0%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%, 110%, 120%, 130%, 140%, 150%, y 200%, por fase. Si se quiere no solo producir hundimientos e interrupciones de tensión, sino que también se quiere producir otros tipos de perturbaciones.
- Los niveles de magnitud para producir fluctuaciones, de  $\pm 12\%$ ,  $\pm 8\%$ , y porcentajes menores respecto del valor nominal, serán opcionales para el diseño. Porque no son debidamente compatibles con el objetivo principal que es la generación de hundimientos de tensión, y esto podría alterar significativamente el diseño.

- 
- El generador deberá producir perturbaciones trifásicas con desbalances, específicamente con desbalance en una fase, y con desbalance simétrico en dos fases, según la norma IEC 61000-4-34 [8].
  - El generador debe producir las perturbaciones o los cambios de tensión en los cruces por cero del semiciclo positivo ( $0^\circ$ ). Esto es muy fácil de aplicar en el diseño de un generador monofásico, pero deberá analizarse en el diseño para un generador trifásico.
  - Las normas y estándares revisados determinan que la realización de pruebas con perturbaciones a diferentes ángulos de fase es opcional, en cuyo caso se recomienda los siguientes ángulos  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $315^\circ$ . En el diseño de este generador se debe analizar la viabilidad de la implementación de esta funcionalidad, es función de los criterios de diseño.
  - El generador de perturbaciones necesita el registro y almacenamiento de las formas de onda y los datos de las pruebas. Durante la totalidad de duración de la prueba, esto para poder analizar la información en la evaluación de inmunidad de equipos.
  - El generador de perturbaciones necesita proveer una plataforma para la programación y/o configuración de las pruebas, en cuanto a la magnitud y la duración (en ciclos). La realización de un conjunto de pruebas, mediante la repetición de una prueba no está contemplada en todas las normas por lo tanto debe ser analizada en el diseño del generador como opcional.
  - El generador deberá ser diseñado para soportar pico de corriente "inrush peak" de hasta 500 A.
  - La salida del generador de perturbaciones puede tener una tolerancia máxima de  $\pm 5\%$ , o  $\pm 10\%$  del voltaje residual, cuando el generador este sin carga o a plena carga en una prueba.

## 2. Generadores de Perturbaciones de Tensión

En la actualidad uno de los aspectos más importantes de calidad de energía (PQ) son las pruebas de inmunidad, estas se realizan para asegurar que las cargas pueden tolerar las perturbaciones de voltaje comunes sin filtrado o equipo adicional. Este tipo de pruebas se realiza con un equipo llamado generador de perturbaciones de tensión, en algunos casos el equipo es de uso específico y puede llamarse generador de hundimientos de tensión, cuando su única finalidad es producir SAG's o DIP's e interrupciones de tensión, también puede llamarse generador de fluctuaciones, cuando su única finalidad es producir flicker's, etc...

En todos los estudios de calidad de energía, se encuentra que la perturbación más común es el hundimiento de tensión, tanto para sistemas monofásicos y trifásicos. Normalmente producidos por fallas, sobrecargas momentáneas, cableado de tamaño insuficiente, conmutación en los transformadores, etc. Los hundimientos de tensión afectan las cargas sensibles en casi todos los escenarios, comercial, residencial e industrial. Un generador de SAG/DIP típico suministra caídas de tensión rectangulares, que son de una profundidad constante y duración variable. La profundidad seleccionada por el usuario típicamente está entre el 40 % y 90 % de la tensión nominal, o puede fijarse en 0% para interrupciones de voltaje. Las duraciones seleccionadas por el usuario normalmente van de 0,5 ciclos a varios cientos de ciclos [25].

Usualmente, los generadores de perturbaciones parecen simples, contruidos sólo con un transformador variable de algún tipo, conmutado con interruptores electrónicos. Estos en realidad son equipos que se están volviendo cada vez más complejos con la adopción de estándares como IEC 61000-4-11/34, SEMI F47, ITIC, IEC 61000-3-3/11/14/15 [25].

Es importante tener en cuenta que para obtener hundimientos (SAG/DIP), Aumentos de tensión (Swell), interrupciones, armónicos, transitorios, corrimientos de fase, y fluctuaciones (Flicker), los generadores de perturbaciones de tensión monofásicos y trifásicos, requieren diferentes topologías [26].

Hay diferentes clases de generadores de perturbaciones de tensión, estas clases dependen de la topología y principio de construcción. Las más comunes son: [25] [26]

- Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador o auto-transformador por conmutación de taps.
- Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie.
- Generador de perturbaciones de tensión basado en reactor controlado por tiristor, por conmutación de impedancia en paralelo.
- Generador de perturbaciones de tensión basado en convertidor conmutado o amplificador de potencia.

## **2.1 Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador o autotransformador por conmutación de taps**

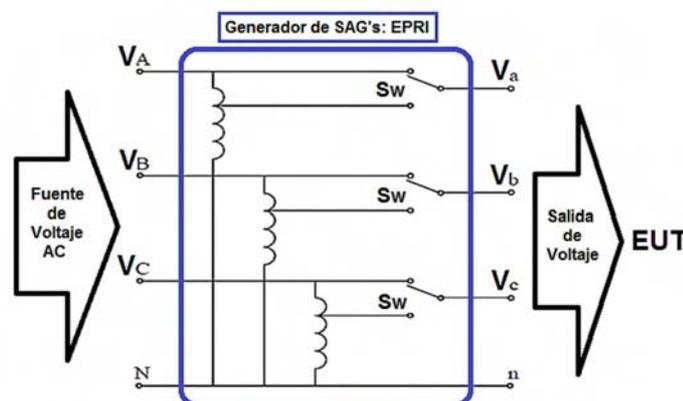
Los generadores de perturbaciones más simples son los basados en transformador y/o autotransformador, permiten el control del valor del voltaje de salida mediante la conmutación de taps. Debido a que el uso de contactores no puede proporcionar una conmutación precisa, la mayoría de los generadores de perturbaciones de tensión utilizan interruptores electrónicos. Para minimizar el transitorio de conmutación, el generador debe conmutar en los cruces por cero de la corriente y/o el voltaje.

Este tipo de generador tiene el inconveniente de ser muy pesado y por lo tanto no suele ser portátil [25] [26] [27].

Como se mencionó anteriormente es posible usar un autotransformador para la construcción de un generador de perturbaciones de tensión, un ejemplo de diseño, es el generador de hundimientos del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) [25] [27]. En el cual se puede resaltar dos aspectos son muy relevantes: su alta capacidad de potencia y la simplicidad de su diseño que se presenta en la Figura 2-1. Este tipo de topología tiene una gran capacidad de generación de perfiles de voltaje con caídas y recuperaciones abruptas. Esta solución es adecuada para la construcción de un generador de perturbaciones de tensión de “tipo” de “laboratorio” de bajo costo, porque se puede usar componentes estándar: como un autotransformador, dispositivos de conmutación electrónica de potencia, y un esquema de control simple [28] [29] .

Un transformador como este funciona en combinación con dispositivos de conmutación apropiados, esta topología adicionalmente puede ser utilizada para generar diferentes tipos de fenómenos como hundimientos de tensión, Aumentos de tensión, interrupciones de corta duración y flickers rectangulares, dado que en este tipo de generadores el conmutador cambia la tensión de salida, de la nominal a la tensión de prueba mediante la conexión-desconexión de las salidas del autotransformador a la carga, permitiendo obtener voltajes superiores y/o inferiores al nominal dependiendo de la construcción del autotransformador.

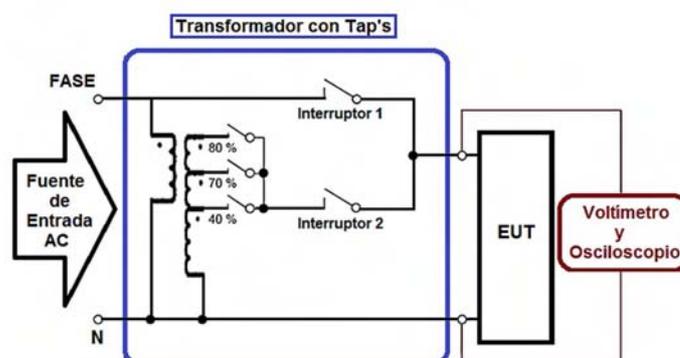
**Figura 2-1:** Generador de perturbaciones de tensión basado en autotransformador (EPRI) [25] [27].



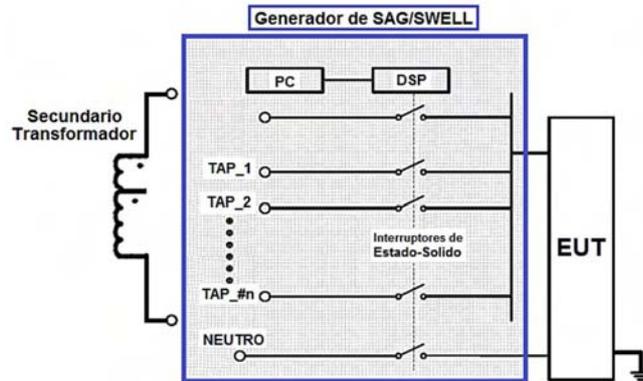
Tanto así que la norma IEC 61000-4-11, en su anexo C, y la norma IEC 61000-4-34, en su anexo D recomiendan para la implementación de los generadores de perturbaciones en laboratorio el uso de transformadores y auto-transformadores, uno de estos esquemas se presenta en la Figura 2-2. En donde mediante el accionamiento de los interruptores Switch 1 y Switch 2, se controla la tensión suministrada al equipo en prueba (EUT), primero se conecta el Switch 1, para entregar un suministro de tensión nominal, y luego se conecta el switch 2, para entregar el voltaje del evento de perturbación cuyo valor es ajustado mediante el selector de taps del transformador [7] [8].

Perturbaciones de tensión como un hundimiento de tensión (SAG/DIP) y una sobretensión (SWELL) monofásica, pueden ser producidas por el generador de la topología mostrada en la Figura 2-3. Donde se muestra como teniendo un transformador, este se utiliza con dos tensiones de salida. La primera salida se fija al 100% de la tensión nominal ( $U_n$ ). La segunda salida se selecciona con el valor de magnitud requerido para el hundimiento proporcional con respecto al valor nominal, según la normatividad establecida para la prueba. El transformador tiene un conjunto de taps que se pueden ajustar para entregar el voltaje en pasos de valor r.m.s. Un DSP, PC, o controlador se utiliza para registrar los datos y conmutar los relés de estado sólido muy rápido entre las dos salidas, para controlar la magnitud y duración [26]. Una ventaja muy importante de esta topología es el aislamiento galvánico ofrecido por el transformador, que a su vez funciona como colchón inductivo, lo cual previene picos muy elevados de corriente en la entrada del sistema de alimentación.

**Figura 2-2:** Generador de perturbaciones de tensión basado en autotransformador. Norma IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-34. [7] [8]



**Figura 2-3:** Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador conmutado. [26]

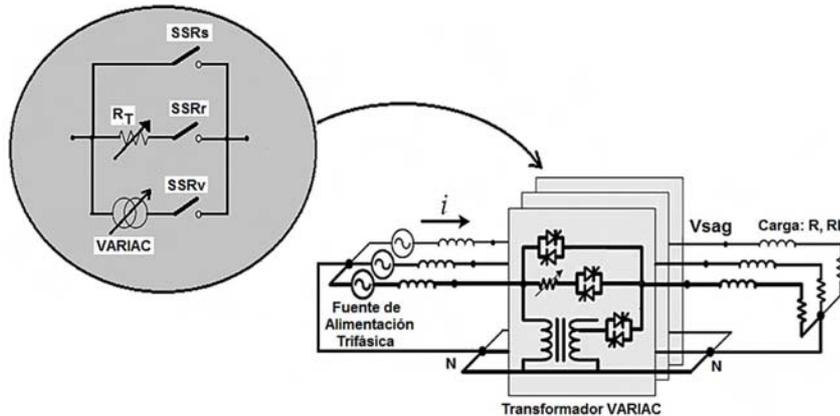


Es importante notar que para la construcción de un generador de perturbaciones de tensión trifásico, basado en transformador y/o auto-transformador con conmutación de taps se requiere el uso de tres autotransformadores y/o un transformador con tres devanados secundarios, y sincronizar el control de los selectores de taps. En el diseño de este tipo de generador es importante tener en cuenta la modularidad y facilidad de utilización, para facilitar esto el conmutador o selector de taps, puede implementarse mediante el uso de las siguientes tecnologías:

- SSR, relés de estado sólido.
- ASIPM, módulos de potencia inteligentes para aplicaciones específicas, como los módulos IGBT.

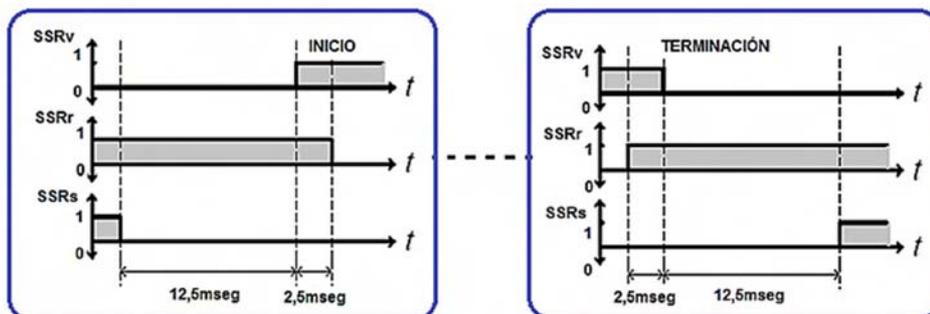
Los SSR disponibles en el mercado constan de tiristores en configuración back-to-back, tienen incluidos los circuitos de driver de compuerta, normalmente con aislamiento galvánico, u óptico, su control se realiza por medio de señales lógicas, por lo cual requieren una pequeña fuente de alimentación CC. Adicionalmente, tienen incluidos los snubbers de protección contra  $dV/dt$ , y elementos de protección contra sobretensiones. Estos se ofrecen comercialmente en módulos monofásicos o trifásicos [30].

Un generador de perturbaciones de tensión que usa un selector de relés de estado sólido, normalmente consta de tres caminos paralelos conmutados por SSR's por fase, Como se muestra en la Figura 2-4, que funcionan a modo de interruptor controlado, insertado entre la línea y la carga en configuración serie [30].

**Figura 2-4:** Ejemplo: Generador trifásico de perturbaciones basado en SSR's [30].

Por fase el interruptor consta de tres relés de estado sólido SSR, en donde el SSR<sub>s</sub>, proporciona la tensión nominal ( $U_n$ ), lo que representa la condición previa al evento de perturbación. El interruptor SSR<sub>v</sub>, proporciona la tensión de la perturbación preestablecida en el transformador, dependiendo de la relación de transformación se pueden producir SAG/DIP, Swell, y/o interrupciones de tensión.

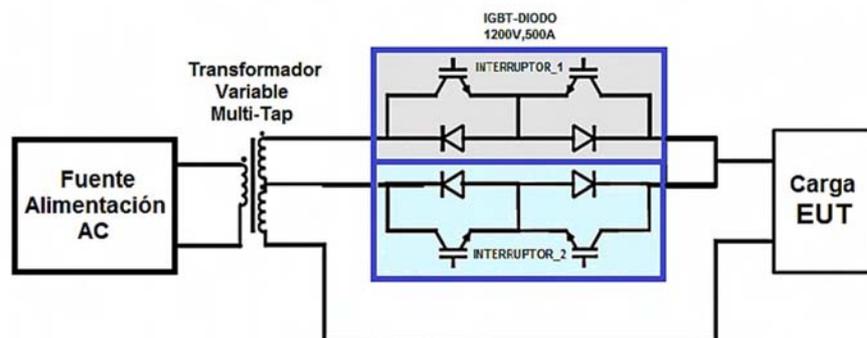
Es importante notar que se puede tener tercer interruptor SSR<sub>r</sub>, para ayudar en la transición de la condición de previa de tensión nominal y la tensión de la perturbación, consistente en la conexión y desconexión de una resistencia de transferencia con el fin de limitar la transición de la tensión y la corriente en los terminales de la carga, esto evita sobrecorrientes en las transiciones de los interruptores. La secuencia de control para la activación y desactivación de los interruptores se presenta en la Figura 2-5, donde se diferencia claramente la secuencia de inicio y de terminación de la prueba [30].

**Figura 2-5:** Secuencia de control para un Generador trifásico de perturbaciones basado en SSR's. [30]

Los ASIPMs, módulos de potencia inteligentes para aplicaciones específicas más comunes para este tipo de aplicación son los módulos de transistores IGBT. Los más sencillos solo son arreglos de IGBT's, y los más complejos llamados Módulos inteligentes IGBT pueden incluir los circuitos de driver de control de compuerta, los circuitos de protección contra sobrecorrientes, los circuitos de protección contra sobretensiones, los circuitos de protección contra desaturación de los transistores, y los circuitos de protección de temperatura, de estas características adicionales dependerá el costo del módulo IGBT [28] [29] [30].

En la Figura 2-6, se presenta un ejemplo de construcción de un generador de perturbaciones monofásico basado en transformador. Este usa para la conmutación de los taps, interruptores bidireccionales con arreglos IGBT-Diodo. En la Figura 2-6 se puede ver que activando el interruptor 1 y apagando el interruptor 2 se cambia la tensión en la carga, es importante notar que dependiendo de la construcción del transformador se pueden generar hundimientos de tensión, elevaciones de tensión, e interrupciones de tensión. Dado que la naturaleza del generador es AC, los interruptores deben ser bidireccionales para permitir la circulación de corriente en ambas direcciones, estos interruptores bidireccionales basados en IGBT permiten rapidez de encendido, de apagado, y control de fase precisa de las perturbaciones de tensión, los diodos también son rápidos y están incluidos en el módulo junto con los transistores en configuración antiparalelo [28] [29].

**Figura 2-6:** Ejemplo: Generador trifásico de perturbaciones de tensión basado en interruptores con transistores IGBT [28] [29].



Para la construcción de generadores de perturbaciones trifásicos simplemente se utilizan transformadores trifásicos con un conjunto de interruptores por cada fase, que normalmente se sobredimensionan para brindar un margen de protección contra Aumentos de tensión y sobrecorrientes. En la Figura 2-6, se recomienda para la construcción de generadores de perturbaciones de tensión el uso de dispositivos IGBT de 1200V de ruptura directa y 500A [28] [29].

En esta topología la conmutación simultánea del interruptor 1, y del interruptor 2, (y viceversa) debe ser evitada, debido a que el solape en los interruptores produce una corriente de cortocircuito que puede superar la máxima corriente que soporta el IGBT (a temperatura de trabajo). Por lo cual, primero debe apagarse uno de los interruptores y luego debe encenderse el siguiente interruptor con un tiempo muerto en su activación. Este tiempo muerto debe ser diseñado precisamente para evitar sobrecargas. Es común que se diseñe el driver de control del IGBT con una conmutación lenta, para lo cual se eligen resistencias grandes de compuerta [28] [29].

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que durante el lento cambio en la conmutación se producen altas pérdidas de potencia en los dispositivos, lo que puede disminuir su vida útil, para evitarlo se hace necesario un sobredimensionamiento de los módulos de potencia. Para proteger los IGBT de sobretensiones, se puede usar Varistorés, en el ejemplo de la Figura 2-6 se presenta el uso de Varistorés de 800V, es común el uso de estos dispositivos por su bajo costo, aunque en condición de fallo entren en corto circuito, lo cual podría afectar otros elementos del generador. Para evitar esto se pueden usar snubbers, que aunque son más costosos, su funcionamiento es mucho mejor para proteger al dispositivo contra  $dV/dt$  y más seguro [28] [29].

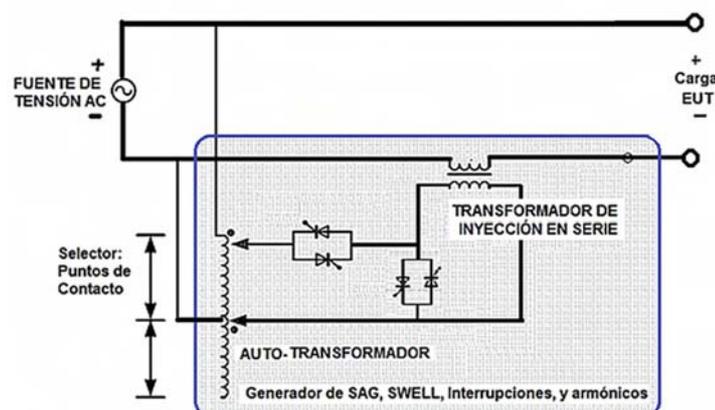
Comparativamente, Para potencias grandes la conmutación puede ser realizada con relés o contactores, pero con ellos es difícil controlar con precisión el tiempo de acción lo que causará interrupciones de tensión de corta duración y sobretensiones indeseadas, lo cual es muy desfavorable, sobre todo cuando se prueban equipos. Con un interruptor bidireccional integrado por tiristores o relés de estado sólido SSR, se tienen muchas ventajas, tales como, alta velocidad de activación del interruptor, una activación libre de ruido, no hay chispa, larga vida del dispositivo, resistencia a la vibración y alta fiabilidad.

Pero el tiristor es un dispositivo de conmutación que tiene solo control de activación, lo que significa que tiene apagado natural y su control seguro sólo puede ocurrir en el punto de cruce por cero de la corriente, lo cual es muy crítico para sistemas trifásicos. Este problema se puede resolver utilizando conmutadores bidireccionales IGBT que son completamente controlables, lo que significa que permiten una activación rápida y un apagado rápido y un control de fase preciso, de las perturbaciones de tensión en sistemas monofásicos y trifásicos [28] [29].

## 2.2 Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie

Un generador de perturbaciones de tensión puede ser implementado utilizando un transformador de manera diferente a la descrita anteriormente, conectando el secundario en serie con la fuente de la alimentación AC. Esto permite mediante la suma de una tensión en serie generar hundimientos de tensión (SAG/DIP), Aumentos de tensión (Swell), interrupciones de tensión, distorsiones armónicas, muescas (Notches), y voltajes desbalanceados. La Figura 2-7 muestra un ejemplo de generador de perturbaciones de tensión para calidad de energía, que usa un autotransformador AC combinado con un transformador de inyección en serie, controlado por tiristores SCR [26].

**Figura 2-7:** Ejemplo: Generador monofásico de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie. [26]

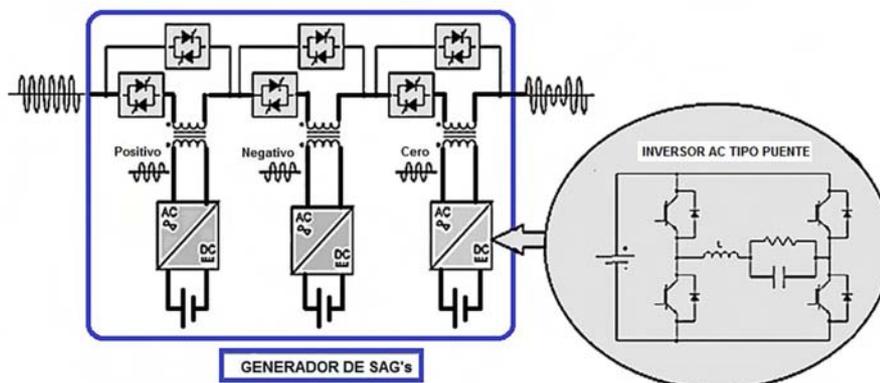


En el generador de la Figura 2-7, La fuente de voltaje  $V_s$ , corresponde al sistema de alimentación AC y su valor r.m.s. es el nominal ( $U_n$ ), el voltaje en la carga (Equipo en prueba EUT) se denomina  $V_c$ , para producir una perturbación de tensión en la carga un transformador ( $T_d$ ) de inyección en serie, este es insertado entre el terminal negativo de la fuente de alimentación AC y el terminal negativo de la salida del generador. El secundario del transformador proporciona la tensión  $V_d$ , que se suma o resta a la tensión nominal para producir la perturbación de tensión [26].

El diseño del autotransformador y de la relación de transformación del transformador de inyección en serie depende de los diferentes tipos de perturbaciones deseados, puesto que su combinación es la que permite ajustar el valor de la tensión de la perturbación. El control de activación de los interruptores bidireccionales basados en tiristores SCR en configuración antiparalelo S1 y S2, permite conectar y desconectar los taps del autotransformador para suministrar la tensión en el primario del transformador de inyección serie y con ello producir la perturbación de tensión.

Los interruptores bidireccionales basados en tiristores SCR en configuración antiparalelo SB1y SB2, son usados como bypass para anular el transformador de inyección en serie, cuando en la carga se requiera tensión nominal, puesto que cortocircuitan el primario del transformador produciendo por defecto un voltaje de 0V en el secundario, también se utilizan en caso de falla para proteger el autotransformador [26].

**Figura 2-8:** Ejemplo: Generador monofásico de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie e Inversor AC [31].



Una variación de este tipo de generador de perturbaciones de tensión para probar equipos electrónicos sensibles, funciona con convertidores conmutados de potencia, y se basa en la inyección en serie de tensiones de componentes simétricas. La topología se muestra en la Figura 2-8 y tiene básicamente tres convertidores conmutados de potencia PWM que son Inversores PWM. Cada uno representa una tensión simétrica: positiva, negativa y cero. Los transformadores son responsables por la adición de estos voltajes y por tanto el valor de la perturbación aplicada. Los Interruptores de bypass son controlados para producir el tiempo inicial y la duración de la perturbación de tensión requerida para la prueba. Las componentes simétricas aportan flexibilidad en la caracterización de perturbaciones de tensión, dado que es posible modificar la magnitud y el ángulo de la perturbación de tensión modificando los vectores que se adicionaran en cada secuencia [31].

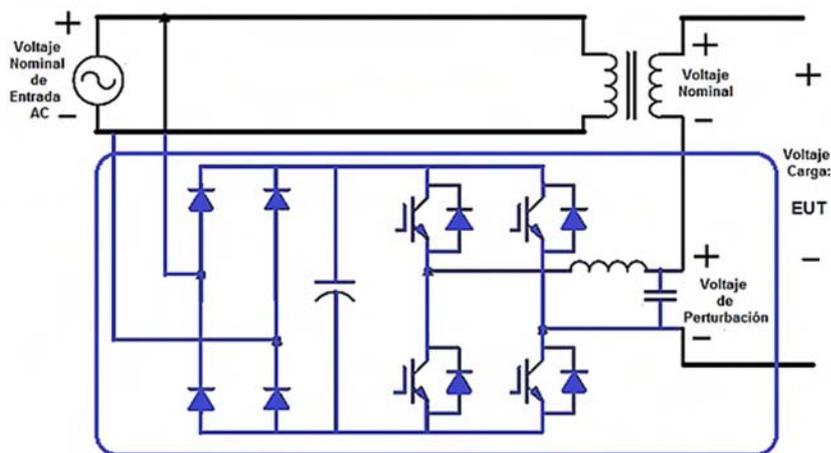
El inversor monofásico en la Figura 2-8 es un inversor de puente completo con modulación PWM y un filtro LC de salida. Este inversor tiene cuatro interruptores con transistores IGBT y es responsable de generar las componentes simétricas variando correctamente el ciclo de útil de la señal de control PWM. Esta modulación PWM es controlada por los vectores de secuencia, en este tipo de generadores el algoritmo debe calcular la magnitud y el ángulo de cada vector de la secuencia de tensión. Este control típicamente se implementa en un DSP o PC. A la salida del filtro se tiene un voltaje sinusoidal con magnitud y ángulo especificado y con baja distorsión armónica [31].

Otra variación de este tipo de generador de perturbaciones de tensión, es la presentada en la Figura 2-9, donde el circuito principal está compuesto un circuito rectificador tipo puente de diodos D1~D4, y un filtro C, para obtener un voltaje DC a partir de la fuente de alimentación AC. Este bus de voltaje DC se utiliza para alimentar el inversor monofásico de puente completo, conformado por cuatro transistores S1~S4, y conmutado por modulación senoidal S-PWM, a la salida del inversor se tiene un filtro pasa bajo LC ( $L_f C_f$ ), para obtener una señal senoidal que se sumara o restara al voltaje del secundario del transformador, de esta manera proporcionando un voltaje de perturbación aplicado al equipo en prueba EUT, este Voltaje de salida  $U_o$ , se expresa en la ecuación siguiente: [32]

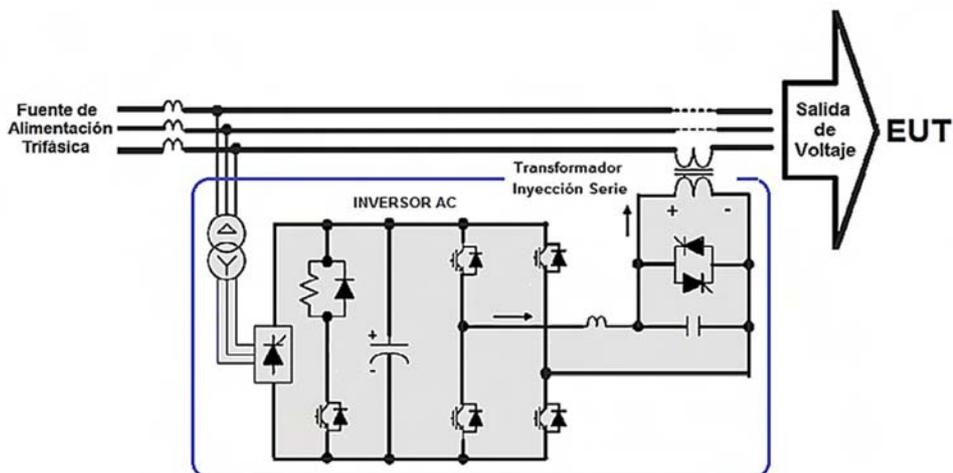
$$U_o = A_1 \sin(w_1 t) - \frac{A_2}{2} [\cos(w_1 + w_2)t - \cos(w_1 - w_2)t] \quad (2.1)$$

Un generador de perturbaciones trifásico basado en la inyección de voltaje usando un transformador en serie se presenta en el Figura 2-10, Este generador de perturbaciones es denominado SSFG (Sag, Swell and Flicker Generator), con esta topología se puede generar perturbaciones eléctricas típicas como hundimientos de tensión, Aumentos de tensión, interrupciones de tensión y fluctuaciones de tensión. El generador SSFG consta de un transformador de conexión en serie ( $T_s$ ), y un transformador de conexión en paralelo ( $T_p$ ), un rectificador, condensadores de CC, un circuito de fijación, un filtro LC pasa bajos y un circuito de bypass con interruptores de estado sólido SSR [33].

**Figura 2-9:** Ejemplo: Generador monofásico de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie con Inversor AC [32].

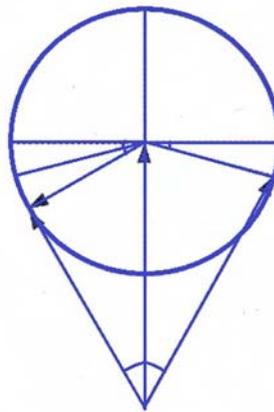


**Figura 2-10:** Ejemplo: Generador Trifásico de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie con Inversor AC [33].



La generación de la perturbación se realiza por modulación en un inversor AC acoplado a un transformador serie ( $T_s$ ), cuyo secundario se conecta en serie a la salida para la inyección de la perturbación. Este generador también puede generar formas de onda de tensión distorsionadas y formas de onda transitorias mediante el control del inversor. La Figura 2-11 muestra el diagrama vectorial que representa la relación entre la tensión de entrada ( $V_s$ ), la tensión de carga ( $V_L$ ) y la tensión de inyección serie ( $V_F$ ). Se puede controlar la diferencia de fase entre la tensión de entrada ( $V_s$ ) y la tensión de carga ( $V_L$ ), mediante la variación de la magnitud y el ángulo de fase de la tensión inyectada ( $V_F$ ) [33].

**Figura 2-11:** Diagrama vectorial de la generación de la tensión inyectada por el Generador Trifásico de perturbaciones de tensión SSFG [33].



De la Figura 2-11, se puede obtener (2.2) mediante el uso de la ley del coseno, donde  $\delta$  es el ángulo de fase entre la tensión de entrada ( $V_s$ ) y la tensión de carga ( $V_L$ ). De la ecuación (2.2) se puede obtener la ecuación (2.3) para despejar la tensión de carga ( $V_L$ ) como una función de la diferencia de fase ( $\delta$ ) y la tensión de inyección ( $V_F$ ). [33]

$$V_F^2 = V_s^2 + V_L^2 - 2V_s V_L \cos \delta \quad (2.2)$$

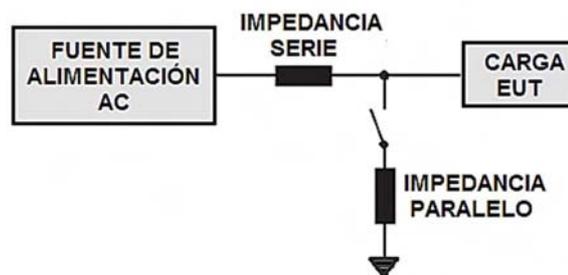
$$V_L = 2V_s \cos \delta \pm \sqrt{V_s^2 \cos^2 \delta - V_s^2 + V_F^2} \quad (2.3)$$

Donde la magnitud del voltaje en la carga (Equipo en prueba EUT) es función del ángulo de diferencia de fase  $\delta$  [33].

### 2.3 Generador de perturbaciones de tensión basado en reactor controlado por tiristor, por conmutación de impedancia en paralelo

Una perturbación de tensión también puede ser producida por la conmutación de una impedancia en paralelo a la línea de alimentación. El flujo de corriente en la impedancia insertada provoca una caída de tensión en la misma, lo que produce un hundimiento de tensión o una sobretensión. En la Figura 2-12 se presenta el esquema de conexión de la impedancia en paralelo para la generación de perturbaciones de tensión. [28] [29]

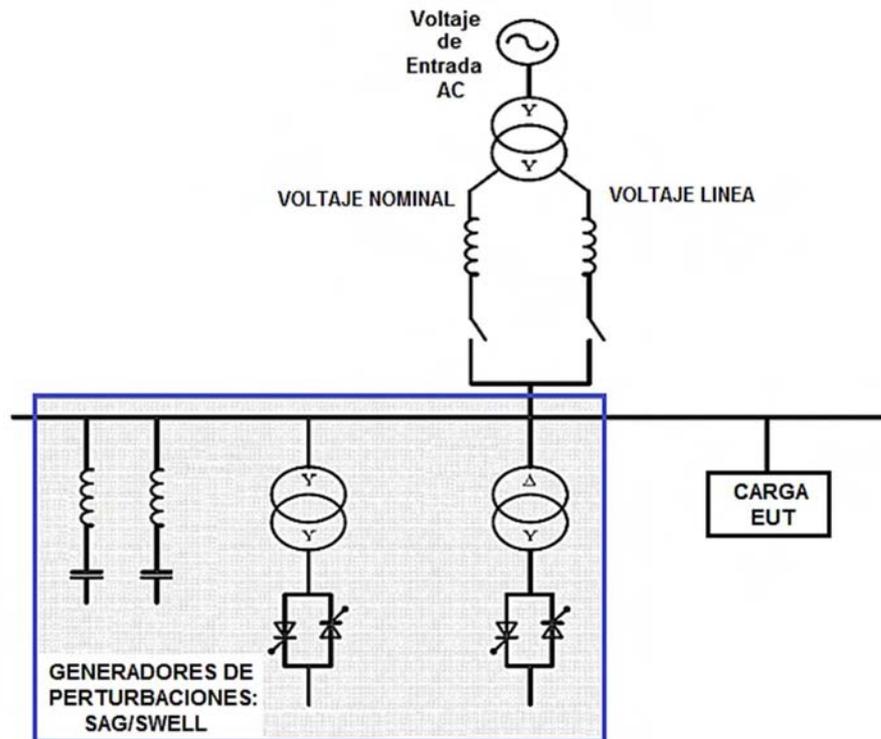
**Figura 2-12:** Esquema de conexión de una impedancia en paralelo para la generación de perturbaciones de tensión [28] [29].



Este generador consta de un reactor controlado por un tiristor bidireccional (TCR), un transformador (TR) y un filtro armónico (LC). El transformador se utiliza para ajustar la tensión de los tiristores. La corriente a través de la impedancia y el nivel de la perturbación de tensión, pueden ser controlados utilizando el método de control del ángulo de disparo por retardo. Este tipo de control produce armónicos no deseados de valores significativos [26] [34] [35].

La Figura 2-13 presenta el esquema del generador de perturbaciones descrito. Los hundimientos de voltaje y bajas tensiones pueden ser generadas usando la caída de tensión en el reactor  $X_n$ , donde los tiristores que conforman los TCR's son activados después que el interruptor  $Sw_1$  es cerrado, la magnitud del evento y su duración dependerá del control del ángulo de activación de los dos TCR's. Para generar elevaciones de tensión, la salida del transformador (TR) es conectada a los TCR's cerrando el interruptor  $Sw_2$ , el valor de la sobretensión es regulado por los dos TCR's [26] [34] [35].

**Figura 2-13:** Ejemplo: Generador de perturbaciones de tensión basado en reactor controlado por tiristor, por conmutación de impedancia en paralelo [26] [34] [35].



Un problema de este sistema es la generación de distorsión en la corriente por las  $3^{th}, 5^{th}, 7^{th}, 9^{th}, 11^{th}, 15^{th}, 17^{th}, 19^{th}$  armónicas, La aparición o supresión de estas depende del ángulo de control de los TCR's, por lo tanto estas armónicas pueden ser eliminadas adicionando filtros armónicos LC. Para reducir esta distorsión durante la operación de los TCR's, esto aumenta el costo del sistema.

Es muy importante notar que dadas las características y costos asociados a este tipo de generador de perturbaciones, esta topología es recomendada solo para grandes potencias (del orden de cientos de KVA, y MVA), y se usa típicamente para el estudio de perturbaciones en sistemas de potencia y distribución o equipamiento en sistemas de potencia y distribución de energía [26] [34] [35].

## 2.4 Generador de perturbaciones de tensión basado en convertidor conmutado o amplificador de potencia

Un generador de perturbaciones de tensión puede construirse también usando circuitos de amplificación lineal. En este tipo de generador las amplitudes y frecuencias de modulación pueden ser asignadas arbitrariamente por un control con una alta precisión. Algunas aplicaciones posibles son: [36]

- La evaluación de los efectos de las fluctuaciones de tensión sobre lámparas incandescentes, fluorescentes y fluorescentes compactas (LFC), en cuyo caso el generador de perturbaciones es llamado generador de flicker.
- La implementación de generadores de Sag/Swell, para equipos electrónicos de baja potencia, dado que una limitante importante del uso de amplificadores lineales es la potencia.

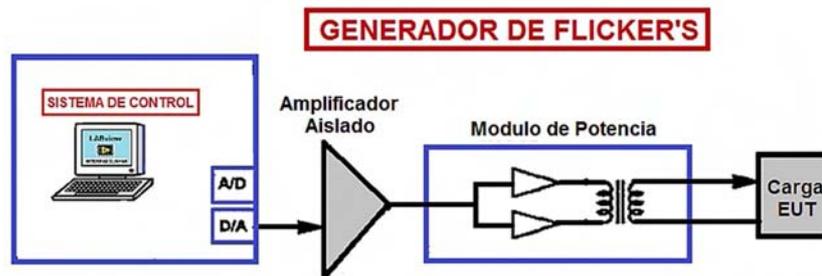
Un ejemplo de este tipo de generador es el presentado en la Figura 2-14, donde la estructura del generador de tensión de flicker se compone de un sistema de control y una etapa de potencia. El control está basado en el uso de microcontroladores, microprocesador o DSP, y la etapa de potencia está basada en el uso de un amplificador de potencia lineal comercial el cual se utiliza para sintetizar la tensión de flicker. La señal de flicker se genera primero el control en forma digital y luego se convierte a una señal analógica que se calcula en tiempo real. Luego, la señal generada de flicker se envía a un módulo lineal amplificador de potencia.

El módulo amplificador de potencia está formado por dos amplificadores de potencia en operación diferencial para aumentar los niveles de tensión y de potencia. Finalmente, la tensión de flicker amplificada se envía a un transformador elevador (44/110), esta relación de transformación puede variarse para el desarrollo de otros tipos de generadores de perturbaciones, teniendo así un amplio margen del nivel de tensión [36].

La potencia nominal de este generador de tensión de flicker es de 200 vatios, que es adecuada para las pruebas de iluminación de lámpara de uso doméstico. Es importante notar que este generador con algunas modificaciones en el transformador y en la

programación del controlador, puede producir hundimientos de tensión y elevaciones de tensión. Pero el uso de amplificadores de potencia lineales limitara la potencia máxima a solo algunos cientos de Vatios, lo que permitiría solo la prueba de equipamiento electrónico sensible de baja potencia [36].

**Figura 2-14:** Ejemplo: Generador de perturbaciones de tensión tipo flicker, basado en Amplificador lineal [36].

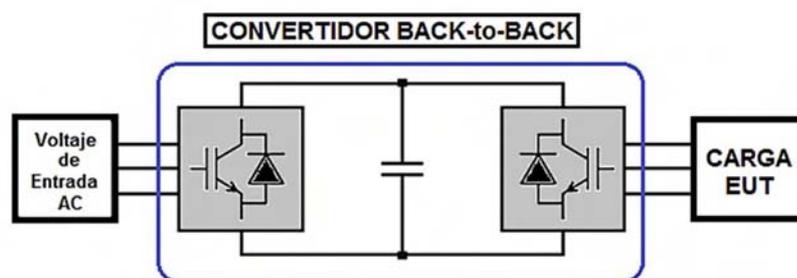


Adicionalmente, se debe tener en cuenta la alta ineficiencia de este tipo de amplificadores, lo que produce una alta disipación de potencia en el generador y mayores pérdidas que con otras topologías. Así mismo los amplificadores de potencia resultan sensibles a transitorios, sobrecorrientes y sobretensiones producidas por fallos en la carga, por lo cual deben diseñarse protecciones apropiadas elevando el costo del generador.

Para la construcción de un generador de perturbaciones trifásico basado en amplificadores de potencia lineales, se debe utilizar un sistema de control con la capacidad de generar tres señales análogas una por cada fase. Las cuales estarán desfasadas  $120^\circ$  eléctricos entre sí para producir perturbaciones en sistemas trifásicos balanceados y otros ángulos si se quiere simular sistemas desbalanceados, o perturbaciones asimétricas, según el estándar aplicado. En cuanto a la etapa de potencia se necesitan tres amplificadores potencia, conformado cada uno con un par de amplificadores de potencia lineales en configuración diferencial. Teniendo en cuenta las limitaciones de operación y eficiencia de los amplificadores lineales, se pueden construir generadores de perturbaciones de hasta 100 vatios por fase [37].

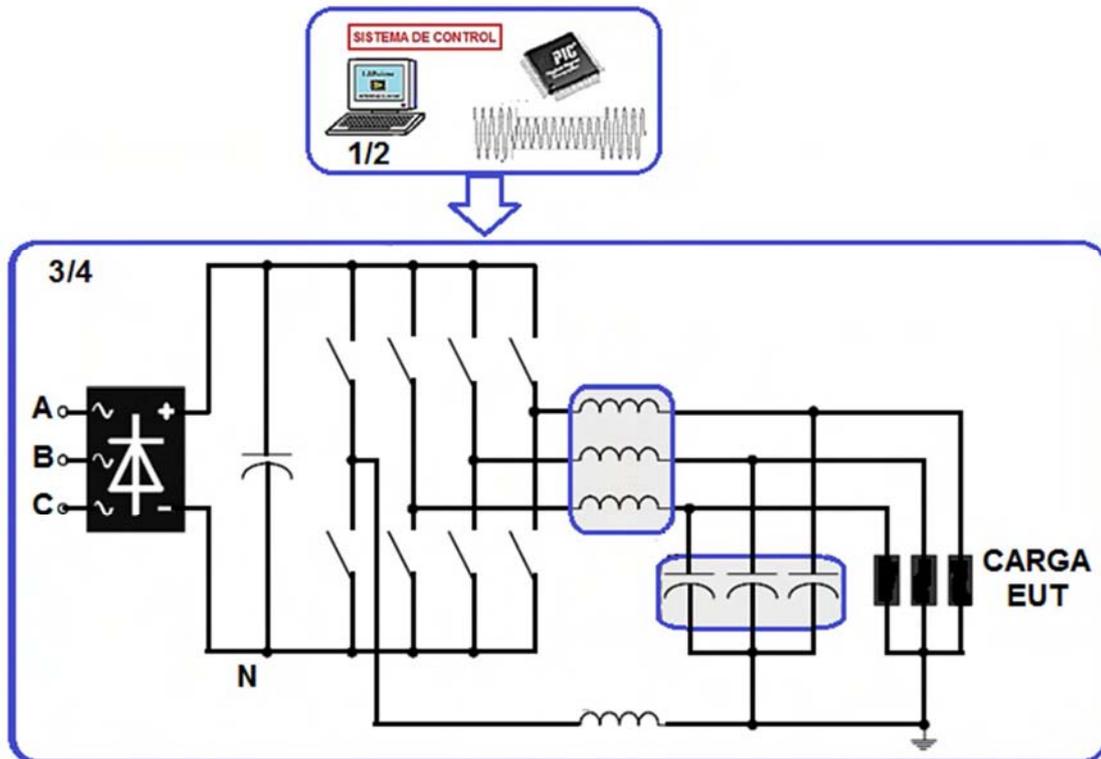
Una solución diferente para construir un generador de perturbaciones de tensión es la basada en el uso de convertidores de potencia conmutados, típicamente un convertidor back-to-back conectado entre la red y la carga o equipo en prueba (EUT). Esta configuración básica se representa en la Figura 2-15, mediante el control de la tensión de salida del convertidor del lado de la carga todo tipo de perturbaciones de tensión de red se pueden emular. En este tipo de topologías el hardware es caro, el algoritmo de control es complicado, y el generador tiene menos fiabilidad debido a la insuficiente capacidad de soportar sobretensiones y sobrecorrientes, en comparación con las otras soluciones para generador de perturbaciones de tensión [28] [29].

**Figura 2-15:** Ejemplo: Generador de perturbaciones de tensión, basado en convertidor de conmutado de potencia, configuración Back-to-Back. [28] [29]



En la Figura 2-16 se presenta el esquema de un generador de perturbaciones de tensión basado en un Inversor trifásico AC conmutado de tres fases y neutro. El generador debe tener un sistema de control que puede ser un PC, DSP, microcontrolador, etc., encargado de la activación y sincronismo de los interruptores de la etapa de potencia. El generador debe tener un software que permita al usuario la programación de la forma de onda de la perturbación de tensión, mediante la selección de la magnitud, duración, fase, y el tipo de perturbación de tensión. Por lo tanto este software es también la interfaz gráfica de usuario (GUI). El generador tiene una etapa de potencia constituida por un puente completo trifásico de transistores y una rama adicional para manejo de corrientes de neutro, este esquema permite manejar la corriente de neutro producida por desbalances, perturbaciones asimétricas, y cargas no lineales. La salida de cada fase del inversor tiene un filtro LC pasa bajos, para el filtrado de las componentes armónicas de orden superior producto de la modulación y conmutación del inversor. El voltaje del bus DC que alimenta el inversor AC es producido por un rectificador trifásico y una etapa de filtrado capacitivo [38] [39].

**Figura 2-16:** Ejemplo: Generador de perturbaciones de tensión, basado en convertidor de conmutado de potencia, configuración Inversor AC. [38] [39]



Actualmente, es muy común que el inversor trifásico AC en topología de puente completo utilice transistores bipolares de puerta aislada (IGBT), con sus respectivos snubber de protección contra Aumentos de tensión. Estos son controlados por modulación de ancho de pulso (PWM), las técnicas de control son variadas, entre las más destacables están las técnicas demodulación vectorial, y modulación sinusoidal S-PWM. La frecuencia de conmutación  $f_{pwm}$  recomendada está en el rango de 100Hz a 10Khz, aunque para evitar distorsiones de la forma de onda significativas y altas perdidas de conmutación se recomienda que la  $f_{pwm}$  este en el rango de 1-2Khz. Por lo cual, los filtros LC se recomiendan de tercer orden, con frecuencia central menor a 1Khz. Aunque, para cargas no-lineales y perturbaciones de tensión asimétricas tales como los hundimientos asimétricos es necesario un filtrado adicional [38] [39].

## 2.5 Comparación de las principales topologías para Generadores de perturbaciones de tensión

Las principales topologías para generadores de perturbaciones expuestas anteriormente pueden compararse en función de su utilidad, versatilidad, simplicidad y costo [26].

### Comparación por utilidad, versatilidad y simplicidad

En esta sección se tendrán en cuenta las características de cada topología, sus ventajas y desventajas, se la topologías de generadores de perturbaciones para comparar su utilidad, versatilidad y simplicidad.

- **Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador o autotransformador por conmutación de taps,**

Este tipo de generador de perturbaciones es generalmente construido como una combinación de un autotransformador o un transformador y dispositivos semiconductores de conmutación apropiados. La generación de los diferentes voltajes de salida es producida por la conmutación de los taps del transformador. Los dispositivos semiconductores pueden ser SSR's, o IGBT's, actualmente por funcionalidad y facilidad en el encendido y apagado se prefieren los IGBT's. Adicionalmente, estos tienen menos pérdidas por corrientes de fuga. Este tipo de generador tiene una muy baja generación de armónicas, por lo que no requiere filtrado de salida. Por estar basado en transformadores soporta mejor los fallos de los equipos en prueba (EUT), puesto que es menos sensible a crecimientos abruptos de la corriente (inrush peak). Su control y procesamiento de señal es complejo [26].

La versatilidad del generador dependerá de la construcción del transformador, si se utiliza un autotransformador es posible generar interrupciones de tensión, hundimientos de tensión monofásicos y trifásicos simétricos, también si el autotransformador es elevador es posible generar elevaciones de tensión y fluctuaciones de tensión rectangulares.

Si se utiliza un transformador y este tiene un conjunto adecuado de secundarios, como en los transformadores tipo Zig-Zag, es posible generar interrupciones de tensión, hundimientos de tensiones monofásicas, y trifásicas simétricas y asimétricas (con desbalance de las fases), si la relación de transformación es elevadora es posible generar Aumentos de tensión y fluctuaciones de tensión rectangulares. Un inconveniente es el tamaño y peso de los transformadores lo que hace de este tipo de generador un equipamiento fijo de laboratorio no apto para ser llevado a campo [26].

- **Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie**

Este tipo de generador de perturbaciones es generalmente construido como una combinación de un transformador y dispositivos semiconductores de conmutación. Existen bastantes variaciones de este tipo de generador, aunque todas tienen en común el uso de un transformador cuyo secundario se conecta en serie con la salida, lo cual permite la inyección de la perturbación en serie con la carga o equipo en prueba [26]. La mayor diferencia se encuentra en la forma como se genera la perturbación antes del transformador de inyección en serie, para lo cual existen dos métodos principales:

Generación de la perturbación utilizando un autotransformador y relés de estado sólido SSR's con tiristores, este generador permite ajustar el valor de la perturbación mediante la conmutación de taps utilizando SSR's. Estos dispositivos presentan el problema de tener corrientes de fuga apreciables que afectan la disipación de potencia. Aunque, este tipo de generador tiene una baja generación de armónicos, estos dependen del ángulo de disparo de los tiristores. Su control y procesamiento de señal es complejo. La versatilidad del generador dependerá de la construcción del autotransformador y su relación con el transformador de inyección serie, es posible generar interrupciones de tensión, hundimientos de tensión monofásica y trifásica simétrica, elevaciones de tensión y fluctuaciones de tensión rectangulares [26]. Generación de la perturbación utilizando un convertidor conmutado de potencia tipo inversor AC de puente completo. Este tipo de generador permite un mayor control de las perturbaciones, requiere etapas adicionales como: rectificadores, elementos de almacenamiento de energía, filtrado, circuitos de bypass, circuitos de clamp y protecciones. Su principales desventajas radican en la necesidad de un convertidor de potencia por cada fase, lo que requiere bastantes

dispositivos semiconductores, por ende su costo es muy elevado. Adicionalmente, requieren un algoritmo de control muy complejo. A pesar de esto su tamaño físico es menor para baja y media potencia, pueden ser diseñados como equipo con algún grado de portabilidad, son útiles para ser llevados a campo [26].

- **Generador de perturbaciones de tensión basado en reactor controlado por tiristor, por conmutación de impedancia en paralelo,**

Este tipo de generador es una combinación de transformadores, reactores controlados con tiristores TCR's, básicamente funciona insertando una impedancia en paralelo a la carga o equipo en prueba. Los diferentes voltajes de la perturbación son ajustados por el control del ángulo de activación de los tiristores. Su principal desventaja es la generación de corrientes con componentes armónicas de baja frecuencia. También tiene alta pérdidas cuando trabaja en región activa. Esta topología requiere de un número alto de componentes y su costo es elevado. Se usa normalmente en aplicaciones para potencias muy grandes de hasta MVA. Con este generador es posible obtener perturbaciones como: interrupciones de tensión, hundimientos de tensión monofásica y trifásica simétrica, Aumentos de tensión [26].

- **Generador de perturbaciones de tensión basado en convertidor conmutado o amplificador de potencia.**

La generación de la perturbación requiere un convertidor conmutado de potencia tipo inversor AC de puente completo, este tipo de generador NO utiliza transformadores. Este tipo de generador permite un mayor control de las perturbaciones, requiere etapas adicionales como: rectificadores, elementos de almacenamiento de energía, filtrado, circuitos de bypass, circuitos de clamp y protecciones. Su principales desventaja radican en la necesidad de un convertidor de potencia por cada fase, lo que requiere bastantes dispositivos semiconductores, por ende su costo es muy elevado. Adicionalmente, requieren un algoritmo de control muy complejo. A pesar de esto su tamaño físico es menor para baja y media potencia, puede ser diseñado como equipo con algún grado de portabilidad, son útiles para ser llevados a campo [26]. En caso de utilizar amplificadores de potencia lineales, estos se utilizan para sintetizar la forma de

onda producida por un sistema control, pueden producir cualquier perturbación, pero están muy limitados por la potencia en su salida, y su muy baja eficiencia. Típicamente para aplicaciones prácticas se utiliza solo para la implementación de generadores de fluctuaciones, para probar lámparas y equipos de iluminación [26].

En la Tabla 1-4 se presenta un análisis simplificado sobre la capacidad de generación de perturbaciones de las diferentes topologías estudiadas, incluyendo una evaluación cualitativa de su simplicidad. También, una evaluación cualitativa del costo asociado a su implementación, resultado de la información consultada incluida en la bibliografía [26].

**Tabla 2-1:** Comparación de topologías de generadores de perturbaciones de tensión.

APLICABILIDAD DE LA TOPOLOGIA: TIPOS DE PERTURBACIONES	TOPOLOGIA DE GENERADOR				
	BASADO EN TRANSFORMADOR O AUTOTRANSFORMADOR POR CONMUTACIÓN DE TAPS	BASADO EN TRANSFORMADOR DE INYECCIÓN EN SERIE		BASADO EN REACTOR CONTROLADO POR TIRISTOR, POR CONMUTACIÓN DE IMPEDANCIA EN PARALELO	BASADO EN CONVERTIDOR CONMUTADO O AMPLIFICADOR DE POTENCIA
		CON GENERACIÓN DE LA PERTURBACIÓN CON AUTOTRANSFORMADOR Y TIRISTORES	CON GENERACIÓN DE LA PERTURBACIÓN CON CONVERTOR CONMUTADO DE POTENCIA (INVERSOR AC)		
HUNDIMIENTOS DE TENSION (SAG/DIP)	SI	SI	SI	SI	SI
AUMENTOS DE TENSION (SWELL)	SI	SI	SI	SI	SI
ARMONICOS	NO	SI	SI	SI	SI
FLUCTUACIONES DE TENSION (FLICKER)	PARCIALMENTE	NO	SI	NO	SI
INTERRUPCIONES DE TENSION (OUTAGE)	SI	SI	NO	NO	SI
MUESCAS DE TENSION (NOTCH)	NO	SI	NO	NO	SI
VOLTAJES DEBALANCEADOS	SI	SI	NO	NO	SI
AUMENTOS DE TENSIÓN	SI	NO	SI	SI	SI
BAJAS TENSIONES	SI	NO	SI	SI	SI
<b>CARACTERISTICAS ADICIONALES:</b>					
SIMPLICIDAD DE CONSTRUCCION	ALTA	MEDIA	BAJA	MEDIA	BAJA
COSTO	MEDIO	MEDIO	ALTO	ALTO	ALTO
ROBUSTEZ	ALTA	MEDIA	BAJA	ALTA	BAJA
PORTABILIDAD	BAJA	MEDIA	ALTO	MEDIA	ALTO

**Nota:** Esta tabla está basada en el análisis de la bibliografía, principalmente la referencia [26].

Para cada topología se analizó: funcionamiento básico, capacidad de generación de diferentes tipos de perturbaciones monofásicas y trifásicas. También sus ventajas y desventajas relacionadas con el costo, simplicidad de diseño, robustez, portabilidad.

Después de realizar la revisión y análisis de cada topología estas se compararon. Esto para poder hacer una evaluación conjunta de sus características, y determinar en función de las perturbaciones deseadas, la topología de generador más apropiada de diseñar e implementar para los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia.

En la Tabla 2-1 se presenta la matriz de comparación de estas características, y finalmente se determina que la topología más apropiada es el **“Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador por conmutación de taps”**.

## 2.6 Metodología para el diseño e implementación del Generador de perturbaciones de tensión

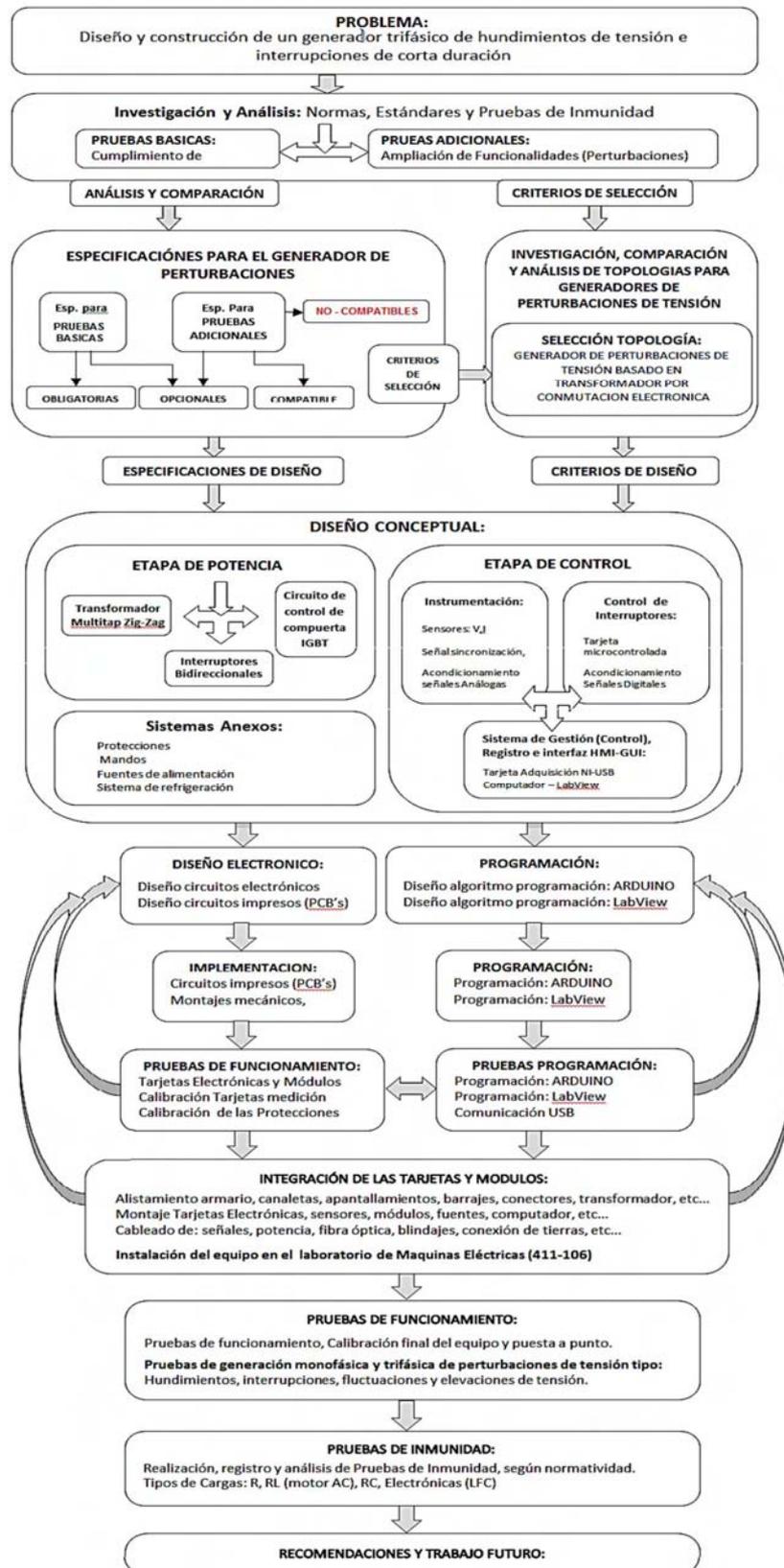
### 1. Investigación y análisis: Pruebas básicas y opcionales

El desarrollo del generador de perturbaciones de tensión parte del objetivo de diseñar e implementar un generador trifásico de hundimientos de tensión, interrupciones de corta duración, y pruebas de inmunidad para equipos entre 16-50 Amperios, que cumpla con las normas IEC 61000-4-11 [7], IEC 61000-4-34 [8], y las pruebas de inmunidad basadas en las curvas SEMI F47 [9] [10] e ITIC (CBEMA) [11]. Para lograr esto se siguió la metodología presentada en la Figura 2-17. En principio se evaluó la posibilidad de aprovechar el desarrollo del generador para producir el mayor número posible de tipos de perturbaciones de tensión. Para esto se investigó, analizó y comparó un conjunto de normas adicionales, que incluyen: IEEE 1159 [12], EN 50160 [20], IEC 61000-4-30 [23], IEC 61000-3-3 [18], IEC 61000-3-11 [22], IEC 61000-4-14 [24], IEC 61000-4-15 [13], y se determinó que los fenómenos transitorios no son compatibles para este desarrollo por tener duraciones inferiores a 0,5 ciclos.

### 2. Especificaciones y criterios de diseño para el generador de perturbaciones

El análisis y comparación de las normas investigadas es consignado en la Tabla 1-5, en este se obtienen las especificaciones básicas y adicionales para el generador de perturbaciones, y una clasificación de las mismas como: obligatorias, opcionales, compatibles y No-compatibles. Las especificaciones obligatorias buscan cumplir la normatividad sobre hundimientos, interrupciones y pruebas de inmunidad, las especificaciones compatibles buscan el cumplimiento de otras normas y pruebas y son iguales o equivalentes a las obligatorias. Las especificaciones opcionales son aquellas que en las normas no son de obligatorio cumplimiento. Finalmente las especificaciones clasificadas como No-compatibles, son aquellas que por su naturaleza su implementación resultaría en un cambio sustancial en el diseño y propósito del generador de hundimientos e interrupciones de tensión, y por tanto no son posibles de implementar, esto implica que algunas de las perturbaciones adicionales implementadas cumplirán la normatividad estudiada, y para algunas perturbaciones no se podrá cumplir.

Figura 2-17: Metodología de diseño e implementación del generador de perturbaciones.



### 3. Investigación, análisis y comparación de topologías para el generador

Teniendo en cuenta el análisis de las perturbaciones básicas y adicionales para el diseño del generador, se procede a investigar, comparar y evaluar las diferentes topologías para la construcción de generadores de perturbaciones monofásicos y trifásicos.

Se clasificaron la topologías para generadores de perturbaciones de tensión en cuatro tipos básicos: 1) Generador de perturbaciones de tensión basados en transformador o auto-transformador por conmutación de taps, 2) Generador de perturbaciones de tensión basados en transformador de inyección en serie, 3) Generador de perturbaciones de tensión basados en reactor controlado por tiristor, por conmutación de impedancia en paralelo, y 4) Generador de perturbaciones de tensión basados en convertidor conmutado o amplificador de potencia. Se evaluó según análisis de las especificaciones obligatorias (Compatibles) y opcionales, la capacidad de generación de diferentes tipos de perturbaciones, y se comparó según criterios de selección como: Simplicidad del diseño, Robustez, Costo, Portabilidad. Esto con el fin de determinar la topología más adecuada, la cual es: **“Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador por conmutación de taps”**.

### 4. Diseño conceptual del generador de perturbaciones de tensión

Con las especificaciones y criterios de diseño se procede a hacer el diseño conceptual del generador, dividiendo el generador en tres sistemas o etapas básicas: etapa de potencia, etapa de control, y sistemas anexos (auxiliares). La etapa de potencia, constituida por el transformador multitap, los interruptores semiconductores bidireccionales, y el circuito driver de control de compuerta para los interruptores de potencia. La etapa de control, constituida por la tarjeta microcontrolada ARDUINO, la tarjeta de adquisición NI-USB, y la interfaz HMI-GUI soportada en software labview hardware PC. Los sistemas anexos son: Sistema de alimentación (fuentes de alimentación DC aisladas), sistema de refrigeración de los módulos de potencia, Tablero de mando, conexiones, y protecciones.

### **5. Diseño e implementación de las etapas o módulos del generador**

Se define la arquitectura de los interruptores bidireccionales y el driver de control de compuerta, y se diseñan los circuitos para las tarjetas de sensores de voltaje y corriente, acondicionamiento de señales analógicas y digitales. También, se diseñan los circuitos impresos PCB's.

Se define la arquitectura del control, se determinan las funciones del control de prueba y de la interfaz HMI-GUI y registro de prueba. También, se diseñan el diagrama de flujo correspondiente a la programación en la tarjeta arduino y labview.

Se realiza la implementación de las tarjetas y programación del control. Luego se prueban las tarjetas y módulos por separado y se realizan correcciones e iteraciones en el proceso hasta que se determina que cada tarjeta y modulo funciona correctamente. Adicionalmente, se realiza la calibración de las tarjetas de acondicionamiento de señales de voltaje y corriente, utilizando como patrón un osciloscopio y un multímetro.

### **6. Integración de etapas y módulos**

Se procede a la integración de las tarjetas y módulos. Para lo cual se acondiciona el armario con bandejas, soportes, canaletas y apantallamientos. Se realiza la instalación física de las tarjetas y módulos en el armario y se procede a cablear las conexiones físicas de potencia, señales de control, fibra óptica, blindajes, conexiones a tierra, barrajes, protecciones, etc... El equipo se instala en el laboratorio de máquinas eléctricas de la universidad nacional de Colombia sede Bogotá, salón: 411-106. Esta etapa del proceso termina con la realización de pruebas de funcionamiento y re-calibración de los módulos sensores y acondicionadores de señales de voltaje y corriente.

### **7. Pruebas de funcionamiento**

Se realiza y documenta un conjunto de pruebas de funcionamiento orientadas a demostrar las funcionalidades del equipo. Específicamente, se demuestra que el equipo puede generar perturbaciones monofásicas y trifásicas del tipo: Hundimientos, interrupciones, elevaciones de tensión, bajas tensiones, sobretensiones, y pruebas de

---

inmunidad, cumpliendo las normas: IEC 61000-4-11 [7], IEC 61000-4-34 [8], IEEE 1159 [12], EN 50160 [20], IEC 61000-4-30 [23]. En cuanto a la fluctuaciones de tensión no es posible cumplir completamente las normas IEC 61000-3-3 [18], IEC 61000-3-11 [22], IEC 61000-4-14 [24], IEC 61000-4-15 [13], por lo cual el generador si puede producir fluctuaciones pero su aplicación es solo didáctica y/o educativa.

### **8. Pruebas de inmunidad**

Finalmente se realiza y documenta un conjunto de pruebas sobre cargas: resistivas (bombillos de filamento), electrónicas (RC, Bombillas LFC), RL (motor trifásico AC), con el fin de demostrar que el equipo tiene la capacidad de realizar todas las pruebas que requiere una “prueba de inmunidad” basada en las curvas SEMI F47 [9] [10] e ITIC (CBEMA) [11]. Esto para eventos de duración mayor igual a 0,5 ciclos.

## RESUMEN CAPITULO

En este capítulo se hizo una revisión de las topologías utilizadas para la construcción de generadores de perturbaciones de tensión. Para su estudio estas topologías se clasificaron en:

- Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador o auto-transformador por conmutación de taps.
- Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador de inyección en serie.
- Generador de perturbaciones de tensión basado en reactor controlado por tiristor, por conmutación de impedancia en paralelo.
- Generador de perturbaciones de tensión basado en convertidor conmutado o amplificador de potencia.

Después de realizar la revisión y análisis de cada topología estas se compararon y se determinó que la topología más apropiada es el **“Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador por conmutación de taps”**.

El generador de perturbaciones de tensión se desarrolló siguiendo la metodología de la Figura 2-17, la cual está basada en la selección de un conjunto de perturbaciones de tensión deseada, y del análisis de las normas y pruebas de inmunidad investigadas. Con esto se determinaron las especificaciones y los criterios de diseño, a partir de los cuales se diseñó conceptualmente el generador de perturbaciones, y luego se desarrolló modularmente. Para finalmente integrar las diferentes etapas, tarjetas, módulos y sistemas en un equipo versátil, funcional, y robusto.

### **3. Arquitectura y módulos de potencia del Generador de Perturbaciones de tensión**

Este proyecto consiste en el desarrollo de un equipo generador trifásico de hundimientos de tensión SAG/DIP e interrupciones de corta duración (una interrupción puede interpretarse como un hundimiento de 100% de magnitud). Un generador de hundimientos de tensión es un equipo que se inserta entre la red eléctrica y el equipo en prueba (EUT). Por tanto, este generador debe producir de manera controlada las perturbaciones de voltaje deseadas y a su vez permitir la adquisición y registro de las variables de corriente y voltaje en el equipo en prueba (EUT). En particular se busca que este equipo cumpla los requerimientos exigidos por las normas internacionales para este tipo de perturbaciones tales como IEC 61000-4-34 [8], IEC 61000-4-11 [7], ITIC, CBEMA y SEMI F47 [9]. Adicionalmente, y aunque no se plantea como un objetivo del proyecto, con algunas modificaciones al diseño se puede también producir perturbaciones de tensión como: elevaciones de tensión (Swell) y sobretensiones, y fluctuaciones de tensión del tipo rectangular, sujetos a las normas IEEE 1159-2009 [12], EN 50160 [20], IEC 61000-4-30 [23], IEC 61000-3-11 [22], IEC 61000-4-14 [24], IEC 61000-4-15 [13], esta capacidad adicional del equipo es parcial, puesto que no se está implicando que se cumpla con la totalidad de estas normas.

Se necesita que el generador de perturbaciones sea flexible y versátil, para permitir el mayor conjunto de pruebas posibles según las diferentes normas. También se requiere que el generador sea robusto, puesto que se utilizara en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia - Departamento de Ingeniería eléctrica y Electrónica para prueba de equipos e investigación en calidad de energía. Por lo tanto, debido a que es común que la carga/EUT falle, el generador de hundimientos se debe especificar para grandes corrientes de pico (Corrientes Inrush), típicamente de cientos de amperios. Si el generador es diseñado para la normatividad IEC 61000-4-11/34 IEC 61000-4-34 [7] [8]

deberá soportar un pico inrush de 500 amperios. Finalmente, dado que para la construcción del equipo se dispone de recursos económicos muy limitados, se hace necesario que este también sea un factor muy importante en el diseño.

Teniendo en cuenta los factores de: **versatilidad** en la capacidad de generación de diferentes perturbaciones, **robustez** ante fallos del equipo en prueba, **simplicidad** de la topología, y moderación en el **costo económico**, se escoge la topología denominada “**Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador por conmutación de taps**”.

Este resultado se basa en el análisis de la información investigada que se incluye en el capítulo 1: en lo referente a los requerimientos de cada norma, y en el capítulo 2: en lo referente a las características de cada topología de generador y cuyo análisis se presenta en la Tabla 2-1. En resumen se tiene:

- **Versatilidad:** Este tipo de generador con el adecuado diseño del transformador, de la etapa de control, y de la etapa de potencia, puede generar hundimientos de tensión, interrupciones de tensión, elevaciones de tensión, y fluctuaciones de tensión rectangulares.
- **Simplicidad:** Aunque su diseño y control no es fácil, comparativamente con los otros tipos de generadores de perturbaciones tiene una simplicidad alta.
- **Robustez:** si se tiene en cuenta en el diseño del control: una correcta activación de los interruptores de la etapa de potencia en los cruces por cero, un dimensionando adecuadamente los dispositivos semiconductores de potencia, teniendo un adecuado diseño de las protecciones, y aprovechando características de los transformadores como son: el aislamiento galvánico y el efecto de colchón inductivo (amortiguamiento de la corriente), el generador podrá soportar fallos en el equipo en prueba EUT, y picos de corriente “inrush”.
- **Costo:** Esta topología a pesar de requerir un transformador, dispositivos semiconductores de potencia y elementos de control, tiene un costo comparativo más bajo que las demás topologías. Esto sí y solo si la configuración del nivel del voltaje de la perturbación se realiza en el transformador por medio de un conmutador manual.

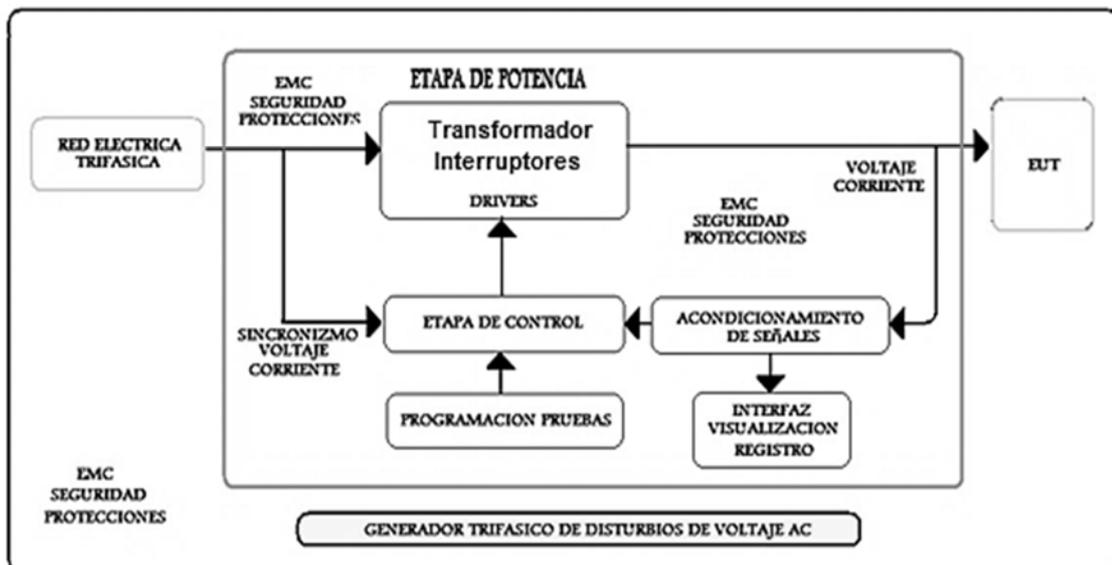
Teniendo en cuenta que la topología escogida para el generador de perturbaciones de tensión es la basada en transformador por conmutación de taps, se deben analizar y diseñar sus diferentes etapas o módulos funcionales.

Para disminuir el costo del generador esta topología será desarrollada para obtener un funcionamiento semiautomático, esto implica que los niveles de tensión serán ajustados de manera manual para cada prueba, esto reducirá la cantidad de interruptores de potencia necesarios.

Este generador de perturbaciones de tensión basado en transformador por conmutación de taps se implementa utilizando un transformador, en combinación con una etapa de potencia basada en dispositivos semiconductores.

Para que los cambios en la conmutación de los taps se realicen por medio de la activación y desactivación de los interruptores de potencia, se requiere de un módulo de control que incluya la programación de las pruebas, la adquisición y registro de las señales, y a su vez sirva de interfaz gráfica hombre-máquina, tal como se presenta en forma general en la Figura 3-1.

**Figura 3-1:** Diagrama general del generador de perturbaciones de tensión, basado en transformador por conmutación de Taps.



En el diseño de deben tener en cuenta consideraciones de compatibilidad electromagnética, seguridad eléctrica y protecciones eléctricas. Adicionalmente, el generador debe ser plenamente compatible con la carga (EUT).

La flexibilidad del generador en cuanto a la capacidad de producir diferentes tensiones para cada tipo de perturbación, dependerá de la construcción del transformador, teniendo en cuenta esto el más adecuado es el transformador trifásico tipo Zig-Zag con seis secundarios, y todos los secundarios con múltiples taps. Esto permitirá la generación de perturbaciones de tensión trifásicas simétricas y asimétricas con desbalance de las fases.

El diseño del módulo del sistema de control para el generador permitirá la programación de las diferentes pruebas de inmunidad y para ello debe sincronizar y enviar las señales de control de los dispositivos de la etapa de potencia del generador.

Para que el control funcione adecuadamente este debe tener módulos de sensores y de acondicionamiento de señales de voltaje y corriente, y módulos de sincronismo con la fuente de alimentación. El control debe tener la suficiente velocidad, memoria, y capacidad de procesamiento.

Adicionalmente, el módulo de control debe registrar y almacenar la información de las señales del equipo en prueba (EUT), obtenidas del módulo de sistema de medición e instrumentación en una prueba.

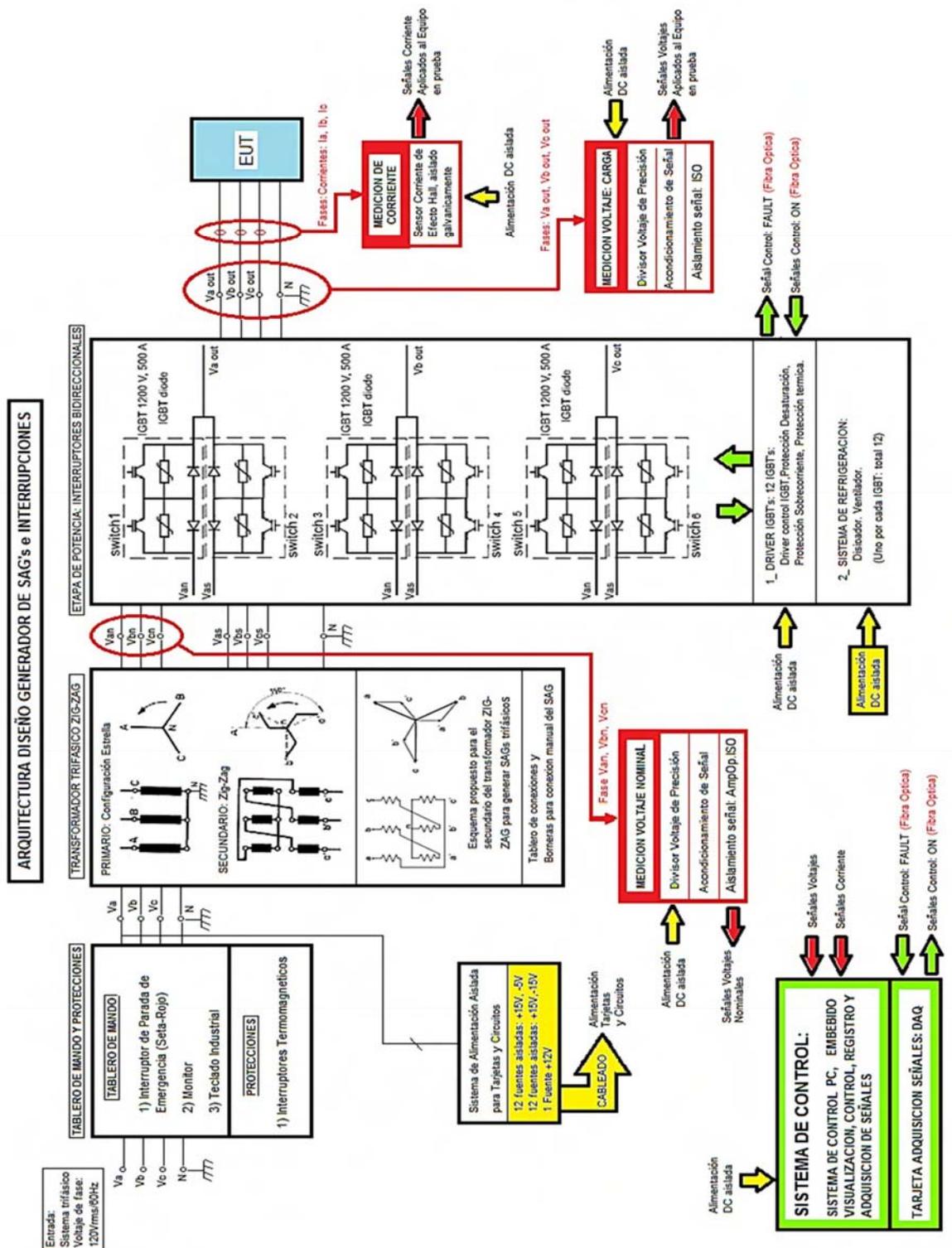
El diseño del módulo de la interfaz gráfica hombre-máquina (GUI-HMI) debe visualizar la información de las señales obtenidas del equipo en prueba (EUT), permitir el ingreso de la información de la prueba, y el registro de los datos de la prueba en algún tipo de archivo de salida para su posterior procesamiento.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente el generador trifásico de hundimientos de tensión de este proyecto se compone de las etapas presentadas en la Tabla 3-1 y en la Figura 3-2, y cuyo diseño y desarrollo son expuestos en este capítulo.

**Tabla 3-1:** Arquitectura generador de perturbaciones: Módulos funcionales.

<b>MODULO</b>	<b>PARTES/ELEMENTOS FUNCIONALES</b>
<b>TABLERO DE MANDO</b>	Pantalla
	Teclado
	Interruptor-pulsador de parada de emergencia
<b>PROTECCIONES</b>	Interruptores termomagnéticos trifásicos
	Sobrecorrientes, corrientes de fallo
	Aumentos de tensión
	Desaturación de Transistores
	Sobre temperatura
<b>SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DC AISLADA</b>	Fuentes DC $\pm 24$ Vdc
	Fuentes DC $\pm 15$ Vdc
	Adaptadores DC
<b>TRANSFORMADOR TRIFASICO ZIGZAG</b>	Transformador Zig-Zag
	Conectores y Barrajes de conexión
<b>ETAPA DE POTENCIA: INTERRUPTORES BIDIRECCIONALES CON TRANSISTORES IGBT</b>	Interruptor bidireccional con transistores IGBT
	Driver control de compuerta para IGBT
	Aislamiento y transmisión de las señales de control
	Circuitos de protección
	Sistema de refrigeración
<b>SISTEMA DE MEDICION Y ACONDICIONAMIENTO SEÑALES ANALOGICAS</b>	Señales de corriente
	Señales de voltaje
	Circuito de sincronismo
<b>MÓDULO DE CONTROL E INTERFAZ GRAFICA HOMBRE-MAQUINA</b>	Hardware Computador, programación de prueba, registro y visualización de datos.
	Software Computador programación de prueba, registro y visualización de datos.
	Tarjeta acondicionamiento de señales de Control de activación de los Interruptores Bidireccionales con IGBT
	DAQ, adquisición señales de voltaje y corriente
	Tarjeta microcontrolada para control de interruptores de potencia
	Software microcontrolador.

**Figura 3-2:** Arquitectura del generador de perturbaciones de tensión, basado en un transformador por conmutación de Taps.



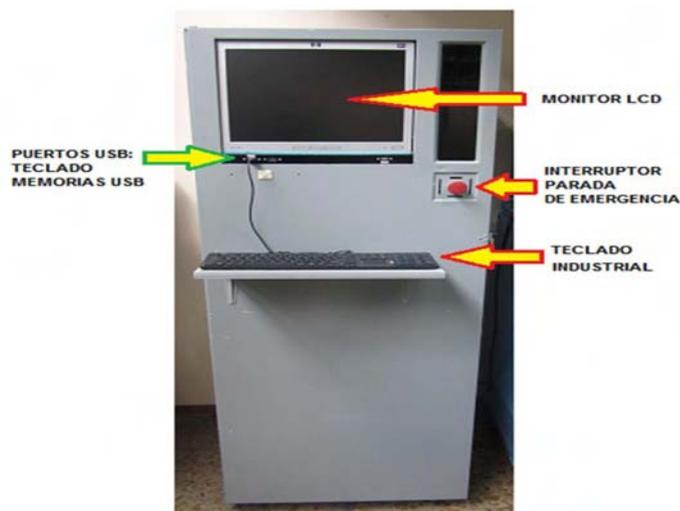
### 3.1 Tablero de Mando

El tablero de mando presentado en la Figura 3-3, tiene los siguientes elementos y funciones:

- **Pantalla:** En el tablero de mando se instaló una pantalla de 14" Lcd, el cual es un monitor de computador marca HP para la visualización de la interfaz gráfica hombre-máquina. Este permite visualizar la interfaz para la programación y manejo del generador de perturbaciones, ver los estados del equipo y la visualización de los datos de las pruebas.
- **Teclado:** Tiene un teclado industrial PERIBOARD-513 con touchpad incluido, funciona como parte de la interfaz hombre-máquina, y permite la interacción del usuario con la programación del generador y los resultados de las pruebas.
- **Interruptor-pulsador de parada de emergencia:** Tiene un pulsador de parada de emergencia, tipo seta de color rojo en la parte frontal del equipo, para que el usuario pueda accionarlo y detener la prueba de un equipo en caso de fallo o daño de este. De referencia: XB2-BA31C tipo twist xb2 interruptor de botón seta con liberación de parada de emergencia schneider electric, 600V/10Amp, Protección IP66.

Las funciones de inicio de prueba y parada de prueba están implementadas en el software y programadas en la interfaz GUI-HMI.

**Figura 3-3:** Tablero de mando generador de perturbaciones de tensión.



### 3.1.1 Problemas y recomendaciones

Por limitación del presupuesto no se pudo construir un tablero de mando más completo, se recomienda que: una vez exista el presupuesto, diseñar e implementar un mando con contactores, pulsadores en interruptores que adicione las siguientes funciones:

- **Interruptor de mando tipo llave:** Se requiere de un interruptor cuya función es la energización y el apagado seguro, de los módulos constitutivos del generador de perturbaciones. Específicamente para: El encendido del computador de control, adaptador de la tarjeta microcontrolada para el control de los interruptores de potencia, y fuente de alimentación del sistema de refrigeración. También debe energizar las fuentes de alimentación DC aisladas que alimentan módulos tales como: las tarjetas driver de los interruptores de potencia, las tarjetas de sensores y acondicionamientos de señal, la tarjeta de acondicionamiento por fibra óptica de la señales de control.

Es particularmente complejo el encendido del computador de control, ya que este no es un computador industrial y su encendido se realiza oprimiendo el botón en la parte frontal del mismo. Ya que el computador se encuentra al interior del armario para encenderlo es necesario abrirlo y hacerlo manualmente. Para que esta función se pueda implementar semiautomática se requiere no solo de un interruptor con llave, también debe diseñarse un circuito de mando con contactores e indicadores.

- **Interruptores-pulsadores de ON/OFF:** se requiere de mandos que conecten o desconecten de manera semiautomática la entrada de voltaje nominal, la entrada de voltaje de perturbación y la salida del generador hacia la carga o equipo en prueba (EUT). Actualmente, el inconveniente radica en que por razones económicas no se pudo implementar la conexión y desconexión semiautomática de estos voltajes trifásicos, por lo tanto se debe realizar manualmente utilizando los termomagnéticos como interruptores, para ello hay que abrir el armario del generador lo cual representa un riesgo para el usuario. Para que esta función se pueda implementar se requiere no solo de interruptores-pulsadores, también debe diseñarse un circuito de mando con contactores e indicadores visuales de los estados.

## 3.2 Protecciones

El generador de perturbaciones de tensión cuenta con dos tipos de protección:

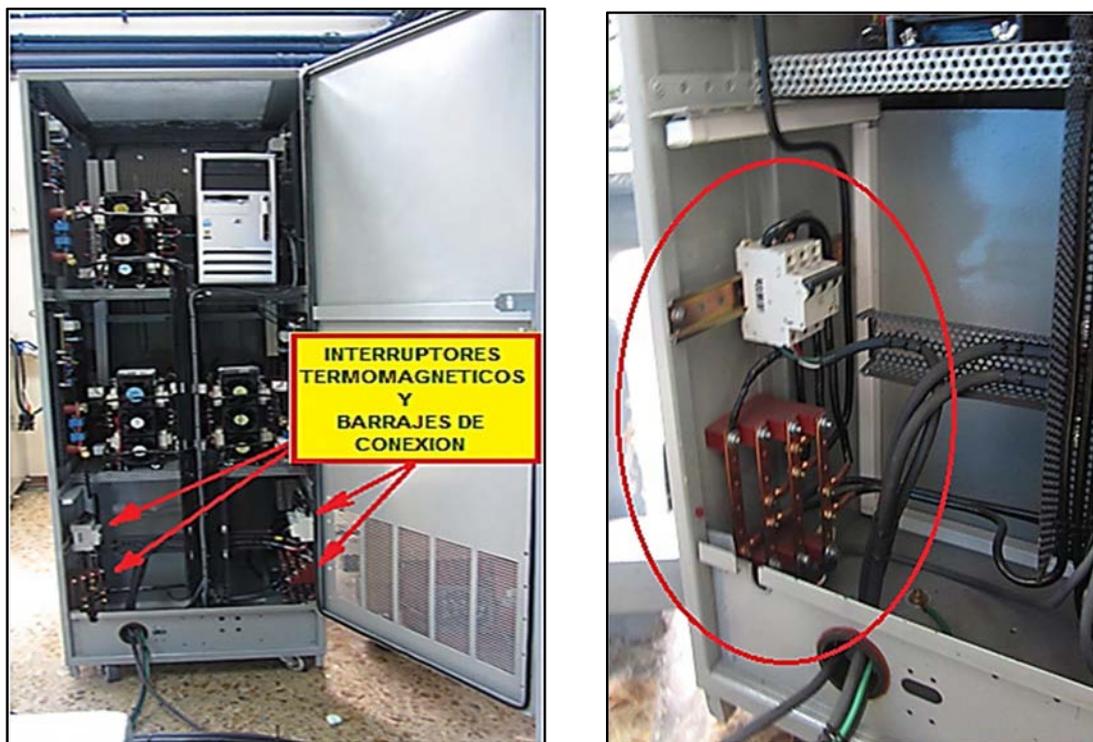
### 3.2.1 Interruptores termomagnéticos trifásicos

Estos interruptores de protección MODELO SH203TC32 se usan en:

- Entre la red de alimentación eléctrica 120Vrms/60Hz por fase y la entrada de tensión nominal del generador, que protege a la red eléctrica de un fallo en el generador.
- Entre la salida del generador zig-zag y la entrada de tensión de perturbación del generador, que protege al transformador de un fallo en el generador.
- Entre la salida trifásica de generador y la carga o equipo en prueba, este termomagnético protege al generador de un fallo en el equipo en prueba.

Las especificaciones y ubicación en el equipo se presentan en La Tabla 3-2 y Figura 3-4.

**Figura 3-4:** Instalación actual de los termomagnéticos de protección en el generador.



**Tabla 3-2:** Especificaciones de los interruptores termomagnéticos de protección. [40]

<b>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO</b>	<b>ABB (VECAS)</b>
MODELO	SH203TC32
FASES	TRIFASICO
CORRIENTE	32A
VOLTAJE AC	400V
MONTAJE	riel DAN

### 3.2.2 Circuitos Electrónicos de Protección

Las otras protecciones implementadas están relacionadas con los interruptores de potencia construidos con transistores IGBT. En el diseño del driver de compuerta se incluyen circuitos de protección/detección de:

- Sobrecorrientes.
- Sobretensiones.
- Desaturación del transistor.
- Sobre temperatura.

Adicionalmente, el circuito driver de compuerta una vez detecta un fallo o estado de alarma envía su señal ópticamente al control, para que este detenga o impida la realización de una prueba.

Todos los aspectos de diseño e implementación de estos elementos y circuitos de protección, están consignados en el subcapítulo dedicado al driver de control de compuerta para módulos IGBT.

### 3.2.3 Problemas y recomendaciones

Los interruptores termomagnéticos instalados actualmente no permiten usar el generador de perturbaciones al máximo de su capacidad diseñada de 75 Amperios, esto es por limitaciones y dificultades presupuestales. Se recomienda como mejora a futuro el cambio de los termomagnéticos y conexiones, por elementos de 75Amperios.

### 3.3 Sistema de Alimentación DC aislada

Las tarjetas y circuitos el generador de perturbaciones de tensión requiere las siguientes fuentes de alimentación DC:

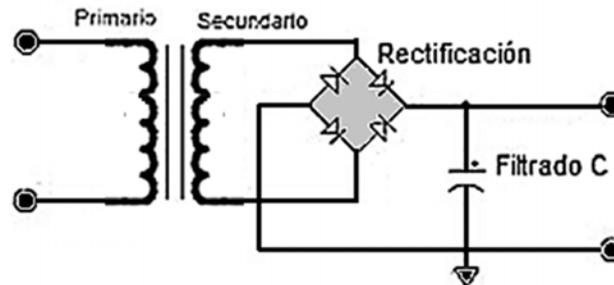
- Fuentes DC aisladas No-reguladas: +24V, -24V, 2 Amperio. Para la alimentación de los circuitos Drivers de disparo interruptores bidireccionales, son no reguladas porque los circuitos driver incluyen sus propios reguladores lineales. Este voltaje se escoge para disminuir la susceptibilidad a la longitud del cableado. Cantidad: 12.
- Fuentes DC aisladas No-reguladas: +18V, -18V, 1 Amperio. Para la alimentación de los circuitos y tarjetas de medición y acondicionamiento de las señales de voltaje y corriente, y la tarjeta de acondicionamiento de señales ópticas, son no reguladas porque las tarjetas tiene sus propios reguladores. Cantidad: 3.

Es necesario garantizar el aislamiento de las fuentes de alimentación, para garantizar la seguridad y la compatibilidad electromagnética del generador. Para resolver esto existen dos soluciones:

- Comprar fuentes conmutadas de alto aislamiento, como las fabricadas por Excelsys Technologies Ltd, TDK-Lambda Americas, Inc y otras empresas, usadas comúnmente en equipos industriales y que ofrecen voltajes de aislamiento entre 1500V y 4KV. Estas fuentes son de montaje en chasis o DIN rail, lo cual es muy adecuado para la construcción de un equipo con características industriales. Esta solución aunque la más adecuada, no fue posible debido a la limitación de presupuesto ya que las fuentes con las especificaciones apropiadas de voltajes de salida, potencia, y aislamiento tienen un costo aproximado de \$100 USD por fuente y se requiere un mínimo de 15 fuentes.
- Construir las fuentes a alimentación utilizando transformadores de alto aislamiento. Dado que el diseño de fuentes conmutadas de alto aislamiento es más complejo y que las fuentes requeridas no deben ser reguladas, se opta por el diseño de las

fuentes usando: transformadores de alto aislamiento con etapa de rectificación y filtrado capacitivo. Como se muestra en la Figura 3-5.

**Figura 3-5:** Esquema fuente de alimentación DC aislada No-regulada.

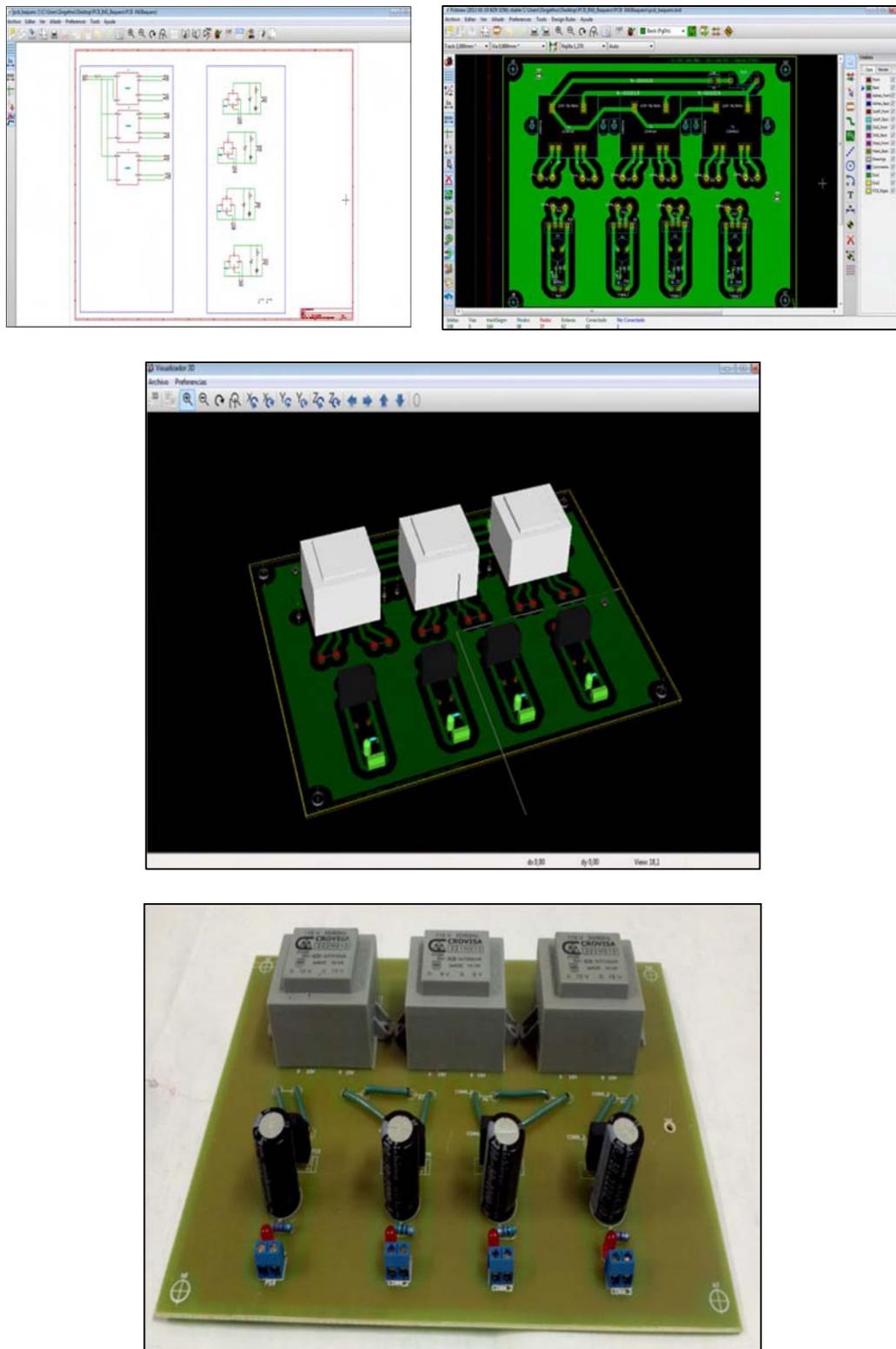


El elemento más relevante de estas fuentes de alimentación, es el uso de transformadores reductores de alto aislamiento CROVISA [41], con los cuales se garantiza un aislamiento mayor a 3KV. Un inconveniente ya mencionado pero definitivo en las decisiones de diseño es el presupuesto, debido a esto se usaron transformadores de diferentes referencias, puesto que ya se disponía de ellos, por lo cual, el diseño de la tarjeta PCB de la fuentes aisladas se diseñó con flexibilidad en la conexión de los transformadores para poder aprovecharlos y obtener los voltajes requeridos.

En la Figura 3-6 se muestra el desarrollo de las PCB y el montaje de los componentes de las fuentes de alimentación aisladas, este desarrollo fue realizado usando como plataforma el software de distribución libre KiCad ([www.kicad-pcb.org](http://www.kicad-pcb.org)). En la Tabla 3-3 se encuentran listados los elementos utilizados: transformadores, fusible, rectificador, filtro capacitivo, borneras, led indicador de estado (ON).

**Tabla 3-3:** Elementos utilizados en las fuentes de alimentación DC aisladas.

COMPONENTE	REFERENCIA	OBSERVACIONES
Transformador	2221H010, 222H010, 218H924	CROVISA, 15-0-15, 12-0-12, 9-0-9
Fusible	1 Amperio	Fusible corto y porta fusible
Rectificador	RS405L, 600V/ 4 A	Puente de rectificador de diodos para montaje en impreso
Condensador	220 uf / 35V	Condensador electrolítico
Diodo Led	Rojo 3mm	Indica estado de funcionamiento normal
Resistencia	2K5, 1/2W	Resistencia 2500 Ω
Bornera	2 terminales	Para montaje en impreso

**Figura 3-6:** Desarrollo fuentes de alimentación DC aislada No-regulada. (KiCad)

## 3.4 Transformador Trifásico ZIG-ZAG

Un transformador Zig-Zag es un transformador especial, que se incluye en la categoría de los transformadores trifásicos. Para obtener una disposición zig-zag los devanados de cada fase del transformador se dividen en dos mitades y estos se interconectan entre sí. Debido a esto el transformador zig-zag es un dispositivo de tres fases, normalmente usado para obtener un punto de neutro y tres líneas.

El neutro formado por la conexión en zig-zag es muy estable. De este tipo de diseño especial se deriva del aprovechamiento de un conjunto resultante de vectores de tres fases conformado por la combinación de los vectores trifásicos existentes, que conducen a una salida estrella o conexión en Y. Por lo cual este tipo de transformador o autotransformador, sirve para el establecimiento de un neutro en un sistema de 3 fases sin conexión a tierra [42] [43] [44].

Se puede utilizar la conexión en zig-zag en un autotransformador donde el primario y secundario no están aislados, el devanado común del autotransformador es la parte de baja tensión y el devanado en serie constituye la parte de alta tensión del transformador. La conexión en zig-zag en un transformador puede realizarse en el primario o en el secundario dependiendo de la aplicación, donde se obtiene la transformación de tensión con la característica de aislamiento [42] [43] [44].

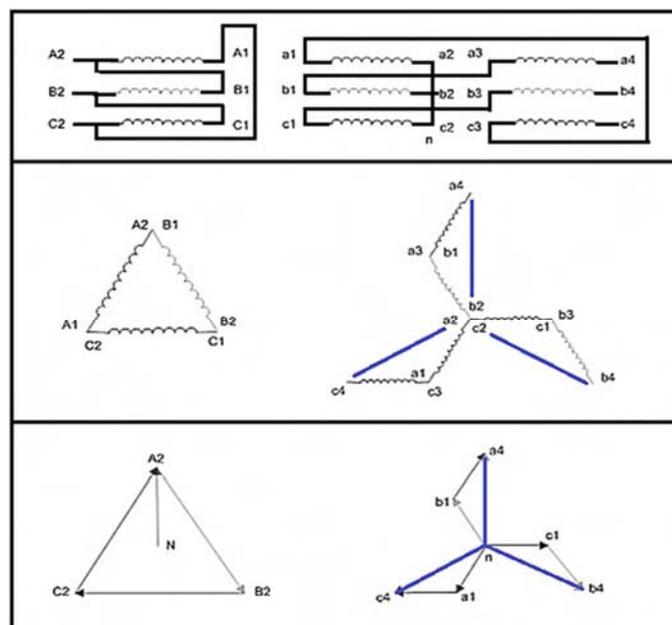
### 3.4.1 Tipos de Transformadores Zig-Zag

Las configuraciones zig-zag son menos comunes para uso industrial o comercial, ya que su construcción es más costosa que la de los transformadores convencionales conectados en estrella. Pero las conexiones de zig-zag son útiles en aplicaciones especiales, en donde las conexiones convencionales no son eficaces. Existen diferentes tipos dependiendo del conexionado de sus devanados [42] [43] [44].

- **Conexión transformador Delta-ZigZag (Dz0)**

En la conexión del transformador zig-zag hay tres devanados en cada una de las tres ramas del núcleo, un devanado primario y dos devanados secundarios. Los devanados secundarios tienen la misma cantidad de espiras. Los devanados A1A2, a1a2 y a3a4, se enrollan en la misma rama del núcleo, por lo tanto todos ellos se demarcan con el mismo color, de manera similar los otros devanados, tal como se presenta en la Figura 3-7 [43].

**Figura 3-7:** Conexión Dz0 de un transformador Zig-Zag [43].

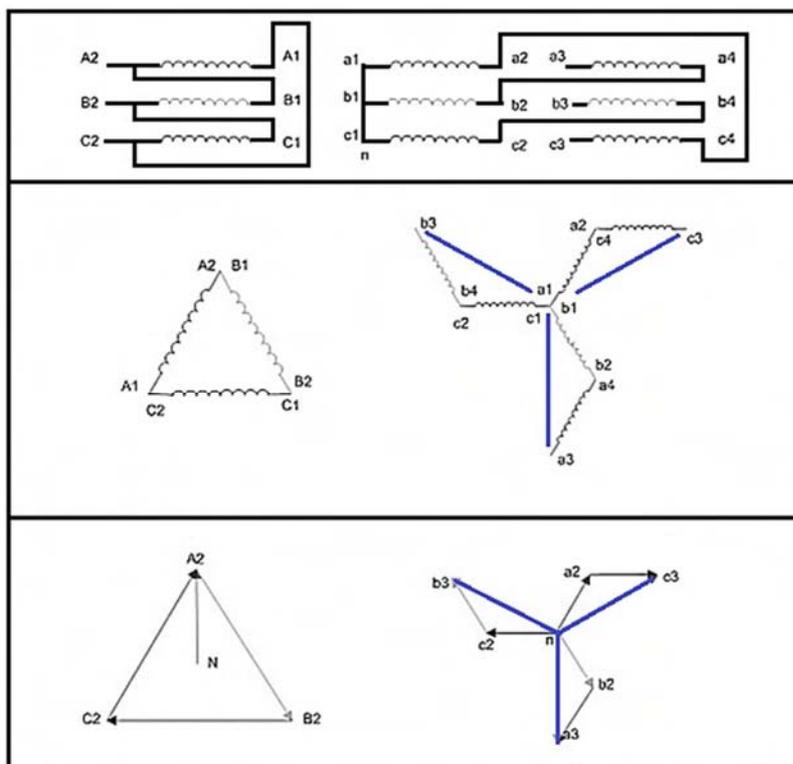


En la conexión Dz0, se conectan los devanados primarios A1A, B1B2, y C1C2, en delta, las conexiones para un secundario en zig-zag son presentadas en la Figura 3-7, donde los devanados secundarios se conectan c1 con b3, b1 con a3, a1 con c3, y los tres terminales a2 con b2 y con c2, conectados entre sí conforman el neutro de salida (n). Los terminales a4, b4, y c4, son las fases de salida. Es importante notar como la conexión puede representarse mediante fasores, mostrando como el voltaje resultante a la salida resulta ser la suma de los fasores de los voltajes de cada devanado secundario. Esta conexión se denomina Dz0, porque los fasores resultantes a la salida tipo estrella no tienen desfase respecto a la entrada tipo delta [43].

- **Conexión transformador Delta-ZigZag (Dz6)**

En esta conexión Dz6 los devanados primarios se conectan en delta, los devanados secundarios se conectan invirtiendo la dirección de fasores con respecto a la conexión Dz0, y así se obtiene automáticamente el grupo de vectores Dz6. Por supuesto, ahora los fasores se reorganizan de acuerdo a las reglas de la suma fasorial, esta conexión se presenta en la Figura 3-8 [43].

**Figura 3-8:** Conexión Dz6 de un transformador Zig-Zag [43].

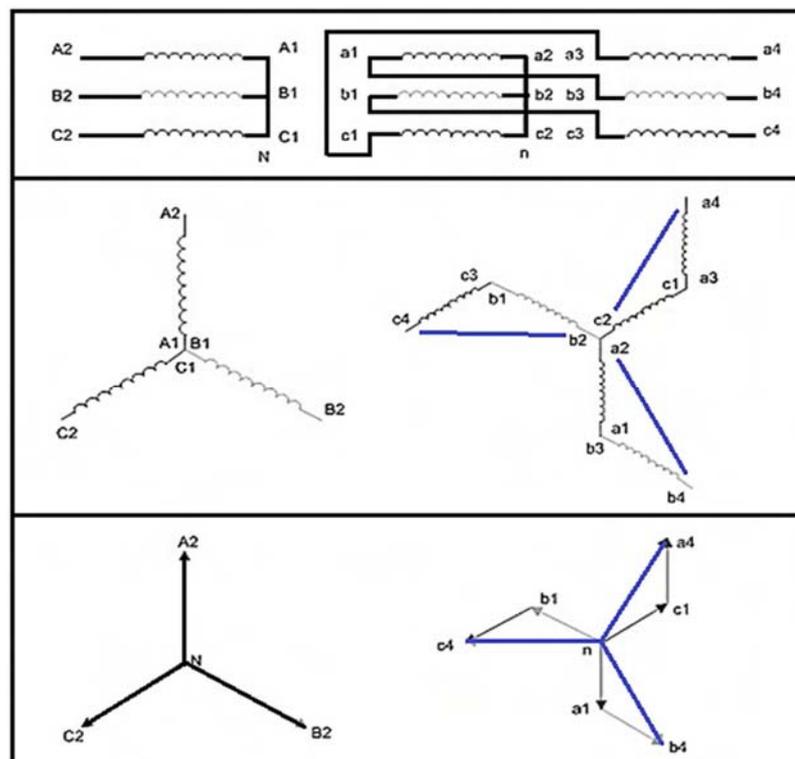


En la conexión Dz6, se conectan los devanados primarios A1A2, B1B2, y C1C2 en delta, para los devanados secundarios se conecta c2 con b4, b2 con a4, a2 con c4, y los tres terminales a1 con b1 y con c1, conectados entre sí conforman el neutro de salida (n). Los terminales a3, b3, y c3, son las fases de salida. Esta conexión se denomina Dz6, porque los fasores resultantes a la salida tipo estrella tienen desfase respecto a la entrada tipo delta, tal como se presentan en la Figura 3-8 [43].

- **Conexión transformador Estrella-ZigZag (Yz6)**

En esta conexión Yz6 los devanados primarios se conectan en estrella, los devanados secundarios se conectan c1 con a3, b1 con c3, a1 con b3, y los tres terminales a2 con b2 y con c2, conectados entre sí conforman el neutro de salida (n). Los terminales a4, b4, y c4, son las fases de salida. Es importante notar como la conexión puede representarse mediante fasores, mostrando como el voltaje resultante a la salida resulta ser la suma de los fasores de los voltajes de cada devanado secundario. Esta conexión se presenta en la Figura 3-9. En esta conexión los fasores resultantes a la salida estrella tienen desfase respecto la entrada tipo estrella [43].

**Figura 3-9:** Conexión Yz6 de un transformador Zig-Zag [43].



Es importante notar que tanto primario como secundario tienen neutro. Adicionalmente, si los devanados secundarios tienen múltiples taps, se pueden obtener diferentes fasores de salida con amplitudes y ángulos de fase dependientes de la conexión de los taps.

### 3.4.2 Análisis configuración de taps del Transformador Zig-Zag

Se escoge inicialmente la configuración Yz6 para el transformador Zig-Zag, dado que esta configuración corresponde a un primario en estrella y la posibilidad de configurar el secundario en estrella también, esto ofrece la ventaja de tener neutro de entrada y salida lo cual es más adecuado para un equipo de prueba de laboratorio. Aun así el transformador requerido deberá ser más flexible en la conexión de los devanados secundarios, con el fin de obtener todos los voltajes simétricos y asimétricos requeridos, y analizados a continuación.

#### Voltajes requeridos para perturbaciones tipo hundimiento de tensión (SAG/DIP) e interrupciones de tensión:

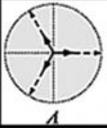
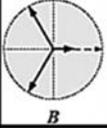
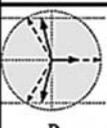
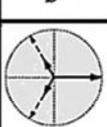
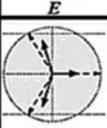
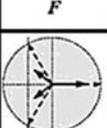
Los voltajes requeridos para la realización de pruebas de hundimientos de tensión SAG/DIP están sujetos a la normatividad: IEEE 1159, IEC 61000-4-34, IEC-61000-4-11, ITIC, CBEMA y SEMI F47 [7] [8] [9] [10] [11] [12]. Para su análisis es necesario clasificar los diferentes tipos de hundimientos de tensión existentes en la normatividad, esta se resume y presenta en la Tabla 3-4, a continuación:

**Tabla 3-4:** Clasificación de los tipos de hundimientos de tensión SAG/DIP [14] [45].

<b>Monofásico y Trifásico</b>	N.A.	<b>Hundimiento fase-neutro:</b> Una fase tiene magnitud de voltaje inferior a la nominal. En sistemas trifásicos las otras dos fases se encuentran con voltaje nominal.
<b>Polifásico (Sistemas trifásicos)</b>	<b>Simétrico</b>	<b>Hundimiento simétrico de dos fases:</b> Dos fases tienen voltaje con magnitud igual pero inferior al valor nominal, y la tercera fase tiene voltaje nominal.
		<b>Hundimiento simétrico de tres fases:</b> Las tres fases tienen voltajes iguales pero de magnitud inferior a la nominal.
	<b>Asimétrico</b>	<b>Hundimiento Asimétrico de dos fases:</b> Dos fases presentan hundimientos con magnitudes diferentes inferiores al valor nominal, y la tercera fase tiene voltaje nominal.
		<b>Hundimiento Asimétrico de tres fases:</b> Las tres fases presentan hundimientos con magnitudes diferentes inferiores al valor nominal.

Nótese que la clasificación incluida en la Tabla 3-4, no contempla los eventos que producen desfases de los fasores de las tensiones en los sistemas trifásicos debidos a fallos en los sistemas de distribución, los cuales se describen en la Tabla 3-5.

**Tabla 3-5:** Clasificación de los tipos de hundimientos de tensión SAG/DIP, de acuerdo al comportamiento completo de los fasores de voltaje en sistemas Trifásicos [14] [45].

TIPO DE SAG	DESCRIPCIÓN DEL SAG/DIP	ORIGEN Y CAMBIO A TRAVÉS DE LA PROPAGACIÓN	CLASIFICACIÓN CORRESPONDIENTE DEL SAG
	LAS TRES MAGNITUDES DE TENSIÓN DE FASE SON IGUALES, Y MENORES AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO  SIN DESPLAZAMIENTO DE FASE	FALLA TRIFÁSICA PROPAGACIÓN: TIPO DE SAG TRANSFORMADOR TIPO SAG A Y <sub>N</sub> Y <sub>n</sub> A A Y <sub>y</sub> , D <sub>d</sub> , D <sub>z</sub> A A Y <sub>d</sub> , D <sub>y</sub> , Y <sub>z</sub> A	SAG TIPO 3  SAG TRIFÁSICO SIMÉTRICO
	UNA MAGNITUD DE LA TENSIÓN DE FASE ES INFERIOR AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO, Y LAS OTRAS DOS FASES TIENEN MAGNITUDES IGUALES Y SUPERIORES AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO  SIN DESPLAZAMIENTO DE FASE	FALLA EN UNA SOLA FASE PROPAGACIÓN: TIPO DE SAG TRANSFORMADOR TIPO SAG B Y <sub>N</sub> Y <sub>n</sub> B B Y <sub>y</sub> , D <sub>d</sub> , D <sub>z</sub> D B Y <sub>d</sub> , D <sub>y</sub> , Y <sub>z</sub> C	SAG TIPO 1  SAG EN UNA SOLA FASE (ASIMETRICO)
	DOS FASES TIENE MAGNITUD IGUAL E INFERIOR AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO, Y UNA FASE TIENE MAGNITUD SUPERIOR AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO.  LAS DOS FASES CON MAGNITUD MENOR AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO PRESENTAN DESPLAZAMIENTO DE LA FASE, ACERCANDOSE CADA UNA A LA OTRA.	FALLA BIFÁSICA, O PROPAGACIÓN EN UNA FASE PROPAGACIÓN: TIPO DE SAG TRANSFORMADOR TIPO SAG C Y <sub>N</sub> Y <sub>n</sub> C C Y <sub>y</sub> , D <sub>d</sub> , D <sub>z</sub> C C Y <sub>d</sub> , D <sub>y</sub> , Y <sub>z</sub> D	SAG TIPO 2  CON DESPLAZAMIENTO DE FASE EN DOS FASES DE IGUAL MAGNITUD  SAG SIMÉTRICO DE DOS FASES CON DESBALANCE
	DOS FASES SON IGUALES CON MAGNITUDES MENORES AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO, PERO DE MAGNITUD MAYOR A LA TERCERA FASE QUE TAMBIEN ES MENOR AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO.  LAS DOS FASES CON MAGNITUDES IGUALES PRESENTAN DESPLAZAMIENTO DE LA FASE, ALEJANDOSE CADA UNA DE LA OTRA.	PROPAGACIÓN EN CUALQUIERA DE LAS DOS FASES O FALLA BIFÁSICA PROPAGACIÓN: TIPO DE SAG TRANSFORMADOR TIPO SAG D Y <sub>N</sub> Y <sub>n</sub> D D Y <sub>y</sub> , D <sub>d</sub> , D <sub>z</sub> D D Y <sub>d</sub> , D <sub>y</sub> , Y <sub>z</sub> C	SAG TIPO 5  CON DESPLAZAMIENTO DE FASE EN DOS FASES DE IGUAL MAGNITUD  SAG TRISAFICO ASIMETRICO
	DOS FASES TIENEN IGUAL MAGNITUD Y MENOR QUE EL UMBRAL DE HUNDIMIENTO, LA TERCERA FASE TIENE MAGNITUD MAYOR QUE EL UMBRAL DE HUNDIMIENTO.  NO HAY DESPLAZAMIENTO DE NINGUNA FASE	FALLA A TIERRA EN DOS FASES PROPAGACIÓN: TIPO DE SAG TRANSFORMADOR TIPO SAG E Y <sub>N</sub> Y <sub>n</sub> E E Y <sub>y</sub> , D <sub>d</sub> , D <sub>z</sub> G E Y <sub>d</sub> , D <sub>y</sub> , Y <sub>z</sub> F	SAG TIPO 2  SAG SIMETRICO EN DOS FASES
	DOS FASES SON IGUALES CON MAGNITUDES MEHORES AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO, PERO DE MAGNITUD MAYOR A LA TERCERA FASE QUE TAMBIEN ES MENOR AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO.  LAS DOS FASES CON MAGNITUDES IGUALES PRESENTAN DESPLAZAMIENTO DE LA FASE, ALEJANDOSE CADA UNA DE LA OTRA.	PROPAGACIÓN DE DOS FASES CON FALLA A TIERRA PROPAGACIÓN: TIPO DE SAG TRANSFORMADOR TIPO SAG F Y <sub>N</sub> Y <sub>n</sub> F F Y <sub>y</sub> , D <sub>d</sub> , D <sub>z</sub> F F Y <sub>d</sub> , D <sub>y</sub> , Y <sub>z</sub> G	SAG TIPO 5  CON DESPLAZAMIENTO DE LA FASE EN LAS DOS FASES DE IGUAL MAGNITUD  SAG TRIFÁSICO ASIMÉTRICO
	DOS FASES TIENE MAGNITUD IGUAL E INFERIOR AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO, Y UNA FASE TIENE MAGNITUD INFERIOR AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO, PERO SUPERIOR A LAS OTRAS DOS FASES.  LAS DOS FASES CON MAGNITUD MENOR AL UMBRAL DE HUNDIMIENTO PRESENTAN DESPLAZAMIENTO DE LA FASE, ACERCANDOSE CADA UNA A LA OTRA.	PROPAGACIÓN DE DOS FASES CON FALLA A TIERRA PROPAGACIÓN: TIPO DE SAG TRANSFORMADOR TIPO SAG G Y <sub>N</sub> Y <sub>n</sub> G G Y <sub>y</sub> , D <sub>d</sub> , D <sub>z</sub> G G Y <sub>d</sub> , D <sub>y</sub> , Y <sub>z</sub> F	SAG TIPO 5  CON DESPLAZAMIENTO DE LA FASE EN LAS DOS FASES DE IGUAL MAGNITUD  SAG TRIFÁSICO ASIMÉTRICO

Los SAG/DIP tipo: A, B, C, y E, son los cuatro tipos básicos de hundimientos, lo que significa que son causadas por cuatro tipos de fallos generales, a medida que ocurren en el lugar del fallo. Estos afectan las tres fases, una sola fase, dos fases, y dos fases con falla a tierra, respectivamente [14] [45]. El SAG/DIP tipo C puede ocurrir como resultado de la propagación de los tipos de hundimientos B y D. El SAG/DIP tipo: D, F, y G son sólo los resultados de la propagación de las caídas causadas por fallas monofásicas y bifásicas (tipo D), o del fallo de dos fases-tierra (para los tipos F y G) [14] [45]. Los SAG/DIP con desplazamiento de la fase tipo C se producen debido a la naturaleza del fallo de dos fases en el lugar de ubicación de la falla, o debido a la propagación adicional de tipos de SAG/DIP B y D a través de los transformadores del sistema de energía.

El cambio de fase para los tipos de hundimiento D, F y G se introduce sólo en la propagación a través de los transformadores del sistema de energía [14] [45].

En la norma IEC 61000-4-11 [7] y en la norma IEC 61000-4-34 [8], se presentan y proponen en el anexo C, los hundimientos de tensión válidos para sistemas trifásicos los cuales son llamados C1: para hundimientos fase-neutro, C2: para hundimientos fase-fase con desplazamiento y disminución de la magnitud en una sola la fase, y C3: para hundimientos fase-fase con desplazamiento y disminución de la magnitud en dos fases. Tal como se presentó en el capítulo 1, en esta norma se plantean las ecuaciones para calcular los vectores asociados a cada hundimiento de tensión de 40%, 70%, 80%, 100%. Estos cálculos se realizaron utilizando Excel y se incluyeron en el presente libro en el Anexo A.

Por lo tanto, el transformador Zig-Zag deberá tener una configuración mínima de taps en sus devanados secundarios para cumplir con los hundimientos de tensión mencionados, en la Tabla 3-6 se muestran los resultados del análisis, donde L1 y \*L1 son devanados secundarios de una misma fase, construidos en una misma rama del transformador, L2 y \*L2, son los devanados secundarios correspondientes a la segunda fase y, L3 y \*L3, son los de la tercera fase.

**Tabla 3-6:** Configuración de taps para cumplimiento de hundimientos de tensión normas IEC 61000-4-11/34, para el transformador Zig-Zag. (Imagen Calculadora en Excel)

TAPS TRANSFORMADOR PARA EL GENERADOR DE SAGS							
CANTIDAD TAPS	L1	(Vrms)	L2	(Vrms)	L3	(Vrms)	TIPO PRUEBA
1	100%	120	100%	120	100%	120	C1,C2
2	90%	108	90%	108	90%	108	C3
3	86%	103	86%	103	86%	103	C3
4	80%	96	80%	96	80%	96	C1,C2
5	70%	84	70%	84	70%	84	C1,C2,C3
6	40%	48	40%	48	40%	48	C1,C2
7	0%	0	0%	0	0%	0	C1,C2,C3
	*L1	(Vrms)	*L2	(Vrms)	*L3	(Vrms)	
1	60%	72	60%	72	60%	72	C2
2	30%	36	30%	36	30%	36	C2,C3
3	20%	24	20%	24	20%	24	C2
4	16%	19	16%	19	16%	19	C3
5	10%	12	10%	12	10%	12	C3
6	0%	0	0%	0	0%	0	C2,C3
39							

También se debe cumplir con los requerimientos para los hundimientos, en las pruebas de inmunidad basadas en la curvas ITIC, SEMI F-47, CBEMA [9] [46] [47] [48], la norma IEEE 1159 [12], y la norma EN 50160 [20]. Esto implica tener en cuenta los siguientes voltajes en los Taps del transformador presentados en la Tabla 3-7.

**Tabla 3-7:** Configuración de Taps para el transformador Zig-Zag, para cumplimiento de hundimientos de tensión norma IEEE 1159, EN 50160, y curvas de inmunidad ITIC, SEMI F-47, CBEMA. (Imagen Tabla Calculadora en Excel)

TAPS TRANSFORMADOR PARA EL GENERADOR DE SAGS										
HUNDIMIENTOS NORMA IEEE 1159, CURVAS DE INMUNIDAD ITIC, CBEMA, SEMI F-47										
CANTIDAD TAPS	L1		L2		L3		TIPO PRUEBA DE INMUNIDAD		NORMAS	
		(Vrms)		(Vrms)		(Vrms)				
1	100%	120	100%	120	100%	120	ITIC, CBEMA, SEMI-F47	IEEE 1159, EN 50160		
2	90%	108	90%	108	90%	108	ITIC, CBEMA, SEMI-F47	IEEE 1159, EN 50160		
3	80%	86	80%	86	80%	86	ITIC, CBEMA, SEMI-F47	IEEE 1159		
4	70%	84	70%	84	70%	84	ITIC, CBEMA, SEMI-F47	IEEE 1159, EN 50160		
5	60%	72	60%	72	60%	72		IEEE 1159, EN 50160		
6	50%	60	50%	60	50%	60	SEMI-F47	IEEE 1159		
7	40%	48	40%	48	40%	48		IEEE 1159		
8	30%	36	30%	36	30%	36		IEEE 1159		
9	20%	24	20%	24	20%	24		IEEE 1159		
10	10%	12	10%	12	10%	12		IEEE 1159		
11	0%	0	0%	0	0%	0	ITIC, CBEMA, SEMI-F47	IEEE 1159, EN 50160		
33										

**Nota:** estas normas no contemplan los tipos de hundimientos para sistemas trifásico asimétricos.

### Voltajes requeridos para perturbaciones tipo Sobretensión tensión: SWELL

En la Tabla 3-8, se presentan los voltajes de sobretensión (Swell) necesarios para la realización de pruebas de inmunidad según las curvas ITC-CBEMA [9] [46] [47] [48], y las normas IEC 61000-4-30 [23], IEEE 1159 [49]. En cuanto a la norma EN 50160 [20] esta incluye las elevaciones de tensión en su análisis, pero no determina valores específicos de sobretensión por lo cual se considera incluida en las anteriores. Las normas y curvas de inmunidad que incluyen las elevaciones de tensión entre los eventos analizados no requieren de desviaciones de fase para estos eventos, puesto que solo se estudia su efecto en la magnitud de la tensión. Si se tiene en cuenta que el transformador trifásico Zig-Zag tiene seis devanados secundarios, dos por fase, los voltajes de elevaciones de tensión se pueden generar utilizando los devanados secundarios de cada fase, conectados en serie, aprovechando la suma de sus voltajes.

**Tabla 3-8:** Configuración de taps para el transformador Zig-Zag, para cumplimiento de Aumentos de tensión normas IEC 61000-4-30, IEEE 1159, EN 50160, y curvas de inmunidad ITC, CBEMA. (Imagen Tabla Calculadora en Excel)

TAPS TRANSFORMADOR PARA EL GENERADOR DE SAGS							
HUNDIMIENTOS NORMA IEEE 1159, CURVAS DE INMUNIDAD ITC, CBEMA, SEMI F-47							
CANTIDAD TAPS	L1	(Vrms)	L2	(Vrms)	L3	(Vrms)	PRUEBA DE INMUNIDAD
N.A.	500%	600	500%	600	500%	600	ITC, CBEMA
1	200%	240	200%	240	200%	240	IEC 61000-4-30
2	190%	228	190%	228	190%	228	IEC 61000-4-30
3	180%	216	180%	216	180%	216	IEEE 1159, IEC 61000-4-30
4	170%	204	170%	204	170%	204	IEEE 1159, IEC 61000-4-30
5	160%	192	160%	192	160%	192	IEEE 1159, IEC 61000-4-30
6	150%	180	150%	180	150%	180	IEEE 1159, IEC 61000-4-30
7	140%	168	140%	168	140%	168	ITC, CBEMA
8	130%	156	130%	156	130%	156	IEEE 1159, IEC 61000-4-30
9	120%	144	120%	144	120%	144	ITC, CBEMA
10	110%	132	110%	132	110%	132	ITC, CBEMA
11	100%	120	100%	120	100%	120	ITC, CBEMA
33							

NOTA: LA SOBRETENSION DE 500%, SOLO APLICA PARA TRANSITORIOS <001 CICLO

### Voltajes requeridos para perturbaciones tipo Fluctuación de tensión: Flicker

Las fluctuaciones de tensión o Flicker, se tratan en las normas IEC 61000-3-3, IEC 61000-3-11, IEC 61000-3-14, IEC 61000-4-15 [22] [50] [13], en estas normas el cambio relativo de tensión puede ser de: 3,3%, 4%, 6%, 7%, 8%, y 12%, teniendo como referencia la magnitud del voltaje nominal que representaría un cambio relativo de 0%.

Dado que los voltajes de los taps necesarios para estudiar los hundimientos de tensión y sobretensión no cubren estos rangos, se tendrían que adicionar algunos taps en el rango de 90% y 110% de la tensión nominal, lo cual sería muy difícil de realizar en la fabricación del transformador trifásico Zig-Zag, por esta razón se decide solamente adicionar un par de taps a 95% y 105%, que permitirá producir fluctuaciones de tensión rectangulares con  $\Delta V=5\%$ , y/o  $\Delta V=10\%$ .

Teniendo en cuenta que el objetivo del proyecto no es la realización de este tipo de prueba no es necesario el cumplimiento de la totalidad de las normas, simplemente se busca con esta pequeña modificación al transformador proporcionarle al generador de perturbaciones una mayor utilidad.

### 3.4.3 Diseño del Transformador Zig-Zag

Para la fabricación del transformador trifásico Zig-Zag se contactó con la empresa **FYR INGENIEROS LTDA.** ([fyri@ingenieros.com](mailto:fyri@ingenieros.com)), fabricante de transformadores de alta experiencia con sede en la ciudad de Bogotá, al informarles sobre los requerimientos del proyecto se recibió de ellos como retroalimentación que una dificultad para construir el transformador era la cantidad de taps. La mayor dificultad está relacionada con los voltajes de tap que se necesitan que no representan una distribución homogénea de los taps, los cuales son 19Vrms (16%) y 103Vrms (82%) incluidos en el cumplimiento de hundimientos de tensión de las normas IEC 61000-4-11/34 [7] [8], reemplazados con taps de 15% y 80% respectivamente, los cuales están en los niveles de tolerancia de la norma. Por lo tanto, atendiendo las recomendaciones del fabricante se decidió la relación de taps incluida en la Tabla 3-10, con un costo final de \$10.000.000 de pesos (donación aportada por el grupo de investigación EM&D-UNAL).

**Tabla 3-9:** ESPECIFICACIONES DE DISEÑO TRANSFORMADOR TRIFASICO ZIG-ZAG.

ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	
<b>Capacidad</b>	42 kVA
<b>Tensión primario</b>	208-120 V
<b>Conexión</b>	Estrella
<b>Devanados del secundario</b>	6
<b>Tensión Secundario</b>	Distribución de taps según Tabla 3-10
<b>Conexión</b>	Zigzag
<b>Impedancia</b>	$< 0,4 + j0,25 \Omega$ (según norma IEC 61000-4-11, Tabla 4, [7])
<b>Impedancia de corto circuito</b>	5%
<b>Regulación</b>	5% en el secundario (20 taps de 6V) por cada secundario
<b>Pérdidas de carga @20°C</b>	900 W
<b>Pérdidas de vacío</b>	300 W
<b>Dimensiones</b>	Encerramiento: Gabinete IP20 con acceso frontal de conexiones. Accesorios: Ruedas giratorias y bornes en tornillos de bronce de 3/8"

**Tabla 3-10:** Configuración Final de taps para el transformador Zig-Zag. (Imagen Tabla Excel)

TAPS TRANSFORMADOR PARA EL GENERADOR DE SAGS						
CANTIDAD TAPS	L1	(Vrms)	L2	(Vrms)	L3	(Vrms)
1	100%	120	100%	120	100%	120
2	95%	114	95%	114	95%	114
3	90%	108	90%	108	90%	108
4	85%	102	85%	102	85%	102
5	80%	96	80%	96	80%	96
6	75%	90	75%	90	75%	90
7	70%	84	70%	84	70%	84
8	65%	78	65%	78	65%	78
9	60%	72	60%	72	60%	72
10	55%	66	55%	66	55%	66
11	50%	60	50%	60	50%	60
12	45%	54	45%	54	45%	54
13	40%	48	40%	48	40%	48
14	35%	42	35%	42	35%	42
15	30%	36	30%	36	30%	36
16	25%	30	25%	30	25%	30
17	20%	24	20%	24	20%	24
18	15%	18	15%	18	15%	18
19	10%	12	10%	12	10%	12
20	5%	6	5%	6	5%	6
21	0%	0	0%	0	0%	0
	*L1	(Vrms)	* L2	(Vrms)	*L3	(Vrms)
1	100%	120	100%	120	100%	120
2	95%	114	95%	114	95%	114
3	90%	108	90%	108	90%	108
4	85%	102	85%	102	85%	102
5	80%	96	80%	96	80%	96
6	75%	90	75%	90	75%	90
7	70%	84	70%	84	70%	84
8	65%	78	65%	78	65%	78
9	60%	72	60%	72	60%	72
10	55%	66	55%	66	55%	66
11	50%	60	50%	60	50%	60
12	45%	54	45%	54	45%	54
13	40%	48	40%	48	40%	48
14	35%	42	35%	42	35%	42
15	30%	36	30%	36	30%	36
16	25%	30	25%	30	25%	30
17	20%	24	20%	24	20%	24
18	15%	18	15%	18	15%	18
19	10%	12	10%	12	10%	12
20	5%	6	5%	6	5%	6
21	0%	0	0%	0	0%	0
126						

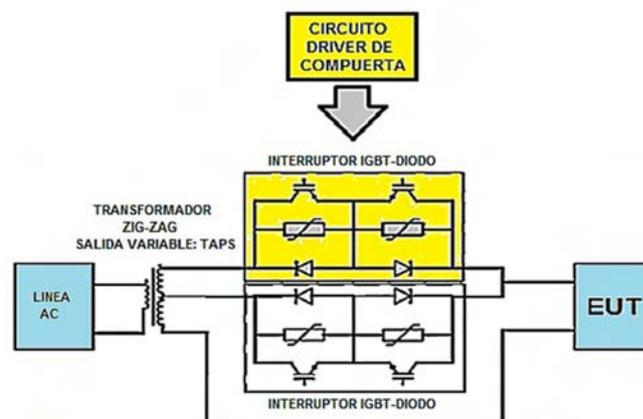
**Figura 3-10:** Transformador Zig-Zag, Marca: Fyr Ingenieros Ltda.



### 3.5 Etapa de Potencia: Interruptores Bidireccionales

El generador de perturbaciones de tensión basado en transformador estudiado en el capítulo 2, está basado en la conexión y desconexión del voltaje nominal y del voltaje de perturbación, entregado por los taps del secundario del transformador Zig-Zag. Debido a que los voltajes son de forma senoidal, y la carga puede tener diferentes factores de potencia, se hace necesario utilizar interruptores bidireccionales, tres para la conexión-desconexión de los voltajes nominales, uno por cada fase, y tres para la conexión-desconexión de los voltajes de perturbación, uno por cada fase. Como se analizó en el capítulo 2, este interruptor no puede ser electromecánico porque tiene una lenta velocidad de respuesta, baja vida útil, y produce ruido en la conexión-desconexión. Tampoco puede emplearse tiristores, debido a los problemas que presentan como el apagado natural, la posibilidad de tener activaciones indeseadas por efecto de la temperatura y por los  $dv/dt$  generados cuando los otros interruptores se accionan. Por otra parte, el transistor bipolar de puerta aislada IGBT, es un dispositivo semiconductor que generalmente se utiliza como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia, es rápido, con baja resistencia en activación, y un eficiente control de activación y apagado. El interruptor bidireccional más adecuado es el presentado en la Figura 3-11, conformado por dos transistores IGBT, y dos diodos de recuperación rápida. Adicionalmente, el interruptor bidireccional requerirá de un driver para el control de las compuertas de los transistores IGBT, con el aislamiento adecuado para garantizar su compatibilidad electromagnética.

**Figura 3-11:** Esquema básico del interruptor bidireccional IGBT-Diodo [28] [29].



### 3.5.1 Arquitectura del interruptor bidireccional

Para la construcción de generadores de perturbaciones de tensión que cumplan la norma IEC 61000-4-11 [7] y la norma IEC 61000-4-34 [8] se recomienda el uso de dispositivos IGBT de  $1200V_{BD}$  y 500A [28] [29].

Se debe tener en cuenta que durante la conmutación se producen altas pérdidas de potencia en los dispositivos, lo que puede disminuir su vida útil, para evitarlo se hace necesario un sobredimensionamiento de los módulos de potencia. Como se mencionó en el capítulo 2, se recomienda usar dispositivos de 500 Amperios, a pesar que los generadores de perturbaciones se diseñan para entregar corrientes r.m.s de hasta 16Amperios, 75Amperios y máximo 250Amperios, esto es porque las normas IEC 61000-4-11 [7] y IEC 61000-4-34 [8], indican claramente que el generador de perturbaciones debe tener la capacidad de soportar picos de corriente inrush de este valor. Por otra parte la condición térmica es importante, puesto que la capacidad de manejo de corriente del dispositivo disminuye con el incremento de la temperatura de juntura. Por esto, hay que balancear la capacidad para soportar picos de corriente de valores altos pero de corta duración y la corrientes r.m.s máxima del dispositivo. En el caso de los diodos, hay que tener en cuenta que su capacidad para soportar voltaje en inverso disminuye con el incremento de la temperatura de juntura. Ahí la importancia de diseñar un adecuado sistema de refrigeración y un sistema de detección de temperatura, para inhibir la activación de los dispositivos cuando la temperatura no sea segura.

Entre las recomendaciones encontradas en el capítulo 2, es claro el criterio de sobredimensionamiento para el voltaje de ruptura directa, puesto que  $1200V_{BD}$  es un voltaje mucho mayor. Para los transistores IGBT esto permite proteger al dispositivo de sobretensiones debidas a la conmutación y a los componentes inductivos parásitos. Adicionalmente, se pueden usar Varistorés como en el ejemplo de la Figura 2-6, en donde se plantea el uso de Varistorés de 800V. Es común el uso de estos dispositivos por su bajo costo, aunque en condición de fallo entren en corto circuito, lo cual resulta indeseable a la salida de un equipo porque podría afectar otros elementos del generador. En muchos casos se prefiere usar snubbers que aunque son más costosos pueden proteger al dispositivo contra  $dV/dt$  y su funcionamiento es mucho más seguro.

La arquitectura empleada para el diseño y desarrollo de la etapa de potencia constituida por los módulos del Interruptor Bidireccional con IGBT se presenta en la Figura 3-12, y se compone de las siguientes partes:

**Interruptor bidireccional con IGBT, cantidad 6 interruptores:**

- Como elementos de potencia del interruptor se requiere de 12 módulos IGBT que contienen un transistor IGBT y un diodo de recuperación rápida en antiparalelo.
- Como elemento de protección se utilizara un snubber por transistor.

**Circuito Driver de control de compuerta para IGBT, uno por cada IGBT:**

- Integrado de control Driver para transistores IGBT, el cual incluye el circuito de protección/detección de desaturación del IGBT.
- Circuito detección sobrecorriente.
- Circuito detección de sobre temperatura del módulo IGBT.
- Circuito de retención de estados de alarma/fallo para la inhibición de la activación de los transistores por sobre temperatura, desaturación, y sobrecorriente.

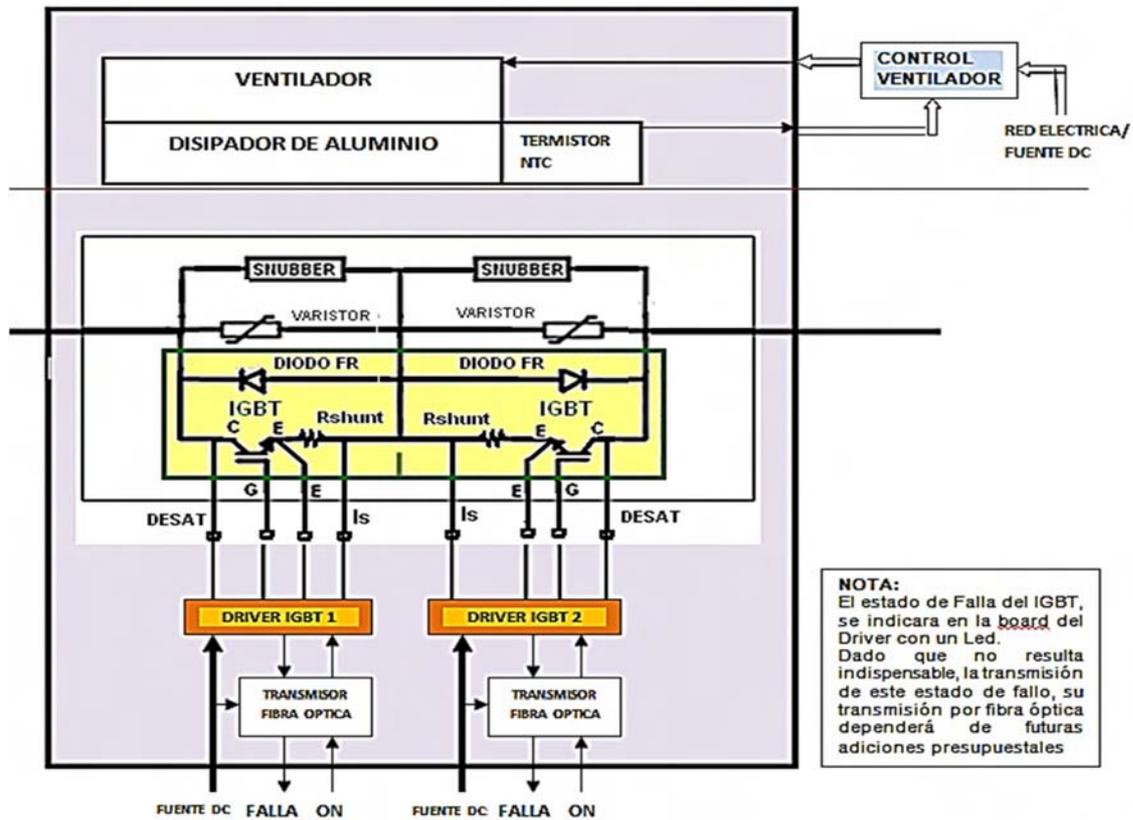
**Sistema de refrigeración, uno por cada módulo IGBT:**

- Disipador de Aluminio.
- Termistor NTC tipo bead-on ring terminal: sensor de temperatura en el disipador.
- Ventilador y soporte de potencia (Fuente de alimentación DC).

**Aislamiento y transmisión de las señales de control por Fibra óptica:**

- Circuito de recepción y transmisión para fibra óptica: incluye diodo transmisor óptico y transistor receptor óptico.
- Fibra óptica y conectores.

**Nota:** El elemento de protección tipo Varistor es opcional.

**Figura 3-12:** Arquitectura del interruptor bidireccional IGBT-Diodo.

### 3.5.2 Interruptor bidireccional basado en módulos IGBT

El módulo de transistor IGBT y diodo de recuperación rápida en antiparalelo escogido es el FZ600R12KE3 de Infineon technologies [51], presentado en la Figura 3-13, este módulo se escogió en primera medida por tener el transistor y diodo en la configuración deseada, por otra parte es un dispositivo con bajas pérdidas de conmutación, adecuada robustez.

Las especificaciones eléctricas para el módulo IGBT son:

- Corriente continua DC: 600Amperios, a 80°C en el encapsulado.
- Corriente de pico repetitivo: 120Amperios, por 1ms, a 80°C en el encapsulado.

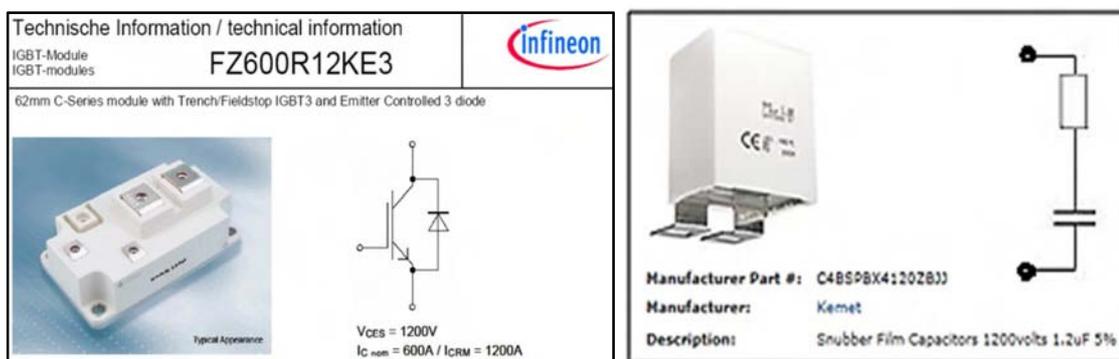
- Voltaje de ruptura directa (IGBT): 1200V a 25°C en el encapsulado.
- Voltaje de ruptura inversa (Diodo): 1200V a 25°C en el encapsulado.
- Tiempo de conmutación típico: 0,8  $\mu$ seg.
- $V_{CE\ sat} = V_{DS\ sat}$ , es pequeño  $< 2.15V$ .
- Costo: Económico \$150 US.

Como elemento de protección contra sobretensiones en los transistores se escoge utilizar un snubber, dado que hoy día el mercado de semiconductores se ofrecen snubbers ya construidos y encapsulados en resina epóxica para transistores IGBT, se escoge el snubber Ref: C4BSPBX4120ZBJJ, de Kemet inc [52], presentado en la Figura 3-13, por tener bajas pérdidas, alta corriente de ondulación, y alta seguridad de contacto.

Las especificaciones eléctricas del snubber son:

- Capacitor de película:  $C = 1,2\mu f$
- $V_{dc} = 1200V$ .
- $V_{rms} = 630V$ .
- $dV/dt = 965V/\mu$ seg, está pendiente es adecuada para proteger al módulo IGBT.
- costo económico: \$12 US.

**Figura 3-13:** Componentes interruptor bidireccional, módulo IGBT-Diodo y snubber [51].



**Nota:** el elemento de protección tipo Varistor es opcional. De escogerse alguno tener en cuenta que sea de voltaje mayor igual a 800V.

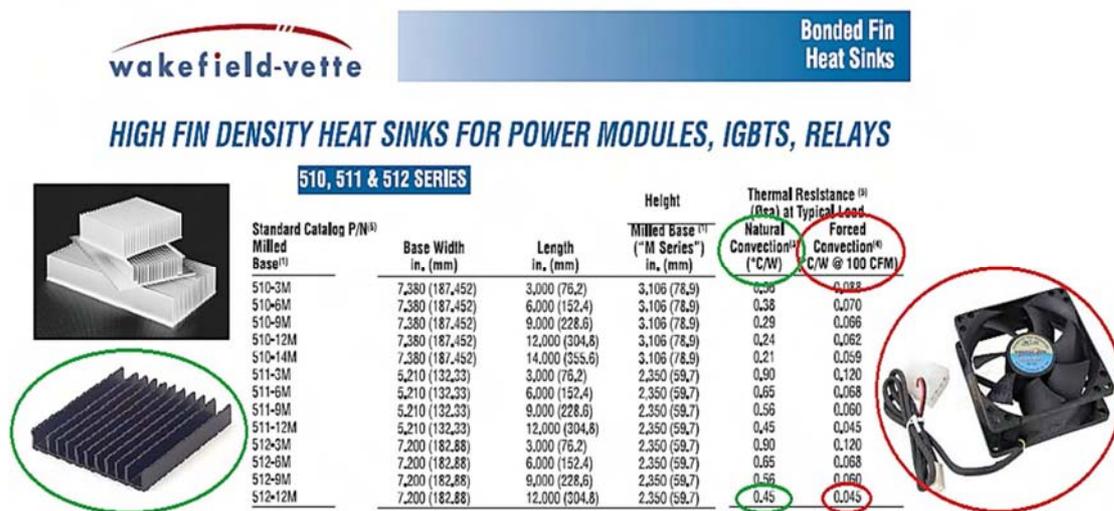
El sistema de refrigeración para el módulo IGBT, está basado en un disipador de aluminio de alta densidad con anodizado negro y un ventilador para convección forzada.

Como condiciones de operación máximas de esta tesis se tiene que la corriente máxima de trabajo es 50Ar.m.s, la normatividad establece como máximo 100Ar.m.s y la caída de tensión máxima en el interruptor es 2,15V, con lo cual la potencia disipada en el módulo es 430W. Si la temperatura esperada en el disipador es 55°C, y la temperatura ambiente 25°C, la resistencia térmica necesaria para el disipador es  $R_{th_{DA}}=0,07^{\circ}\text{C/W}$ .

Es importante notar que con los disipadores más grandes para módulos de potencia IGBT esta resistencia térmica no se puede obtener, puesto que la mínima para el tamaño apropiado de disipador es de  $0,45^{\circ}\text{C/W}$  [53] [54], como se muestra en la Figura 3-14.

Para disminuir lo suficiente la resistencia térmica es necesario utilizar un ventilador para convección forzada con una capacidad entre 30CFM a 100CFM [55].

Figura 3-14: Sistema de refrigeración del interruptor de potencia.







Como puede verse en el circuito presentado en la Figura 3-16, el primer operacional (A) realiza una amplificación diferencial de la caída de tensión en la resistencia shunt, el circuito RC de entrada es un filtro pasa bajo, y la detección de la sobrecorriente se realiza en el segundo amplificador (B) que funciona como comparador. El valor de limitación de sobrecorriente es calibrado utilizando un trimmer que permite ajustar el valor del voltaje de comparación. Según la norma IEC 61000-4-11 [7] y la norma IEC 61000-4-34 [8], el generador debe soportar un pico inrush de máximo 500 Amperios. Por lo tanto, inicialmente este es el valor máximo de la corriente permitida. Dado que la resistencia shunt es de  $0,00025\Omega$ , la caída de tensión producida en los terminales de la resistencia es de 125mV, Pero para dar un margen apropiado al diseño y teniendo en cuenta que el IGBT soporta 600A, la protección se escoge a 540 Amperios con un voltaje de detección de 135mV. Dado que la ganancia diferencial del primer amplificador es de 10, el voltaje de comparación para la detección de sobrecorriente es de 1,35Vdc.

El circuito de detección de sobre temperatura utiliza un sensor de temperatura tipo termistor NTC, referencia B57045K0103K [60], de EPCOS AG. Este sensor de temperatura se escoge porque es de montaje en chasis, lo que facilita su colocación en el disipador para el módulo IGBT, y así tener una medida confiable y rápida de la temperatura en el disipador. Es importante notar que es imposible medir la temperatura interna del módulo IGBT, pero podemos inferirla ya que conocemos las resistencias térmicas:  $R_{th_{JC}}$  junta-encapsulado [51] y  $R_{th_{CH}}$  encapsulado-disipador. Por lo tanto midiendo la temperatura en el disipador, podemos obtener un valor aproximado de la temperatura en la junta.

Con el uso de amplificadores operacionales para la amplificación y comparación se puede construir un detector de sobre temperatura aceptable para la aplicación. En la Figura 3-18, se muestra el circuito diseñado, el cual está calculado para activar la protección cuando el disipador alcance los  $55^{\circ}\text{C}$ .

Para establecer el valor límite de temperatura permitido en el disipador ( $T_H$ ) se necesita la temperatura máxima de junta de los dispositivos incluidos en el módulo IGBT, que según la nota de aplicación es de  $150^{\circ}\text{C}$  [51]. Es recomendable tomar un valor inferior con un margen de seguridad, la nota de aplicación recomienda establecer  $125^{\circ}\text{C}$  [51]

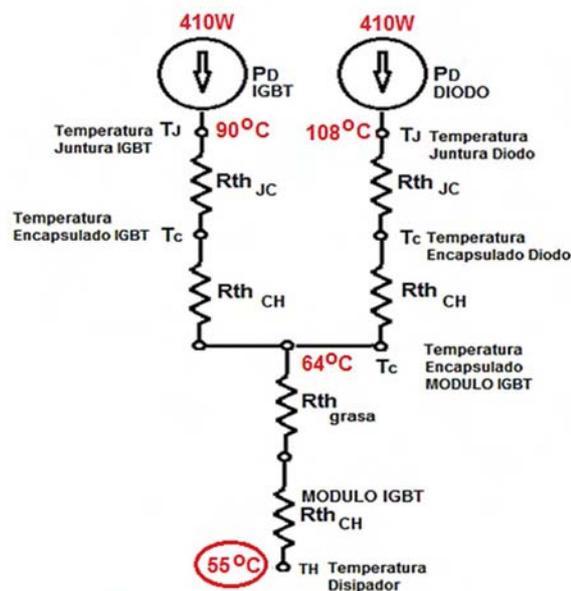
como valor de límite máximo de temperatura en la junta. También se debe tener en cuenta la información suministrada en la nota de aplicación sobre los valores máximos de las resistencias térmicas, los cuales son:

- Para el IGBT interno:  $R_{th_{JC}}=0,045^{\circ}/W$  y  $R_{th_{CH}}= 0,016^{\circ}/C$  [51].
- Para el Diodo interno:  $R_{th_{JC}}=0,08^{\circ}/W$  y  $R_{th_{CH}}= 0,028^{\circ}/C$  [51].
- Para el módulo:  $R_{th_{CH}}= 0,01^{\circ}/C$  [51].

La conductividad térmica de la grasa siliconada usada entre el módulo de potencia y el disipador es de  $1W/m^{\circ}$ , lo que representa un resistencia térmica de  $R_{th_g}=0,001^{\circ}/W$ . Para que el diseño sea seguro es necesario tener en cuenta el peor caso, que corresponde al pico de corriente establecido para la protección en corriente de 540 Amperios-pico.

Esta corriente se asume senoidal, y circula en un semiciclo por el diodo y en el otro semiciclo por el transistor, por lo tanto su valor r.m.s. total es  $I_{rms} = \frac{540}{\sqrt{2}} = 382Ar.m.s$ , según la nota de aplicación la caída de tensión máxima en saturación del transistor y en conducción en el diodo es:  $V_{CE sat} = V_{DON} = 2,15V$  [51]. La potencia máxima disipada por cada dispositivo del módulo será  $P_{D max} = \frac{382 \cdot 2,15}{2} = 410W$ .

**Figura 3-17:** Circuito térmico del módulo IGBT.

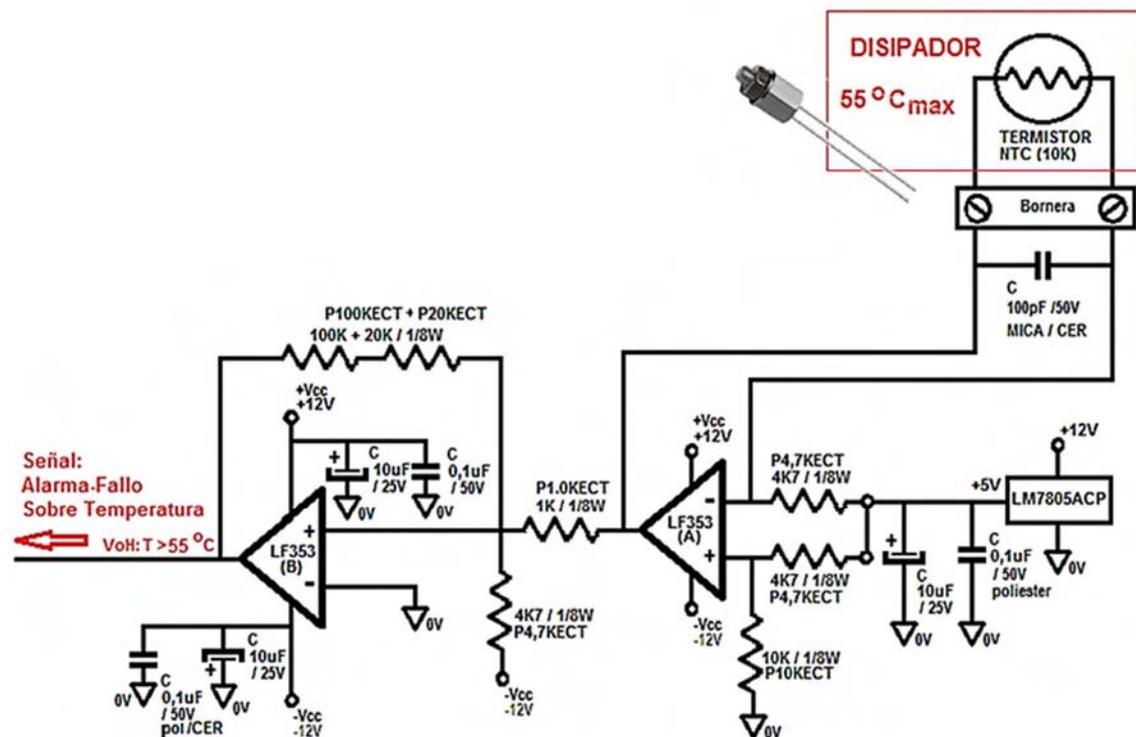


Para establecer la temperatura máxima permitida en el disipador es necesario analizar el sistema térmico descrito en la Figura 3-17, como resultado del análisis la temperatura crítica de juntura es la correspondiente al diodo de recuperación rápida interno en el módulo IGBT.

El sensor de temperatura tipo termistor NTC, referencia B57045K0103K [60], que tiene un resistencia de referencia de  $10\text{K}\Omega$  a  $25^\circ\text{C}$ , y puesto que su coeficiente térmico es negativo tiene una resistencia de  $2724,3\Omega$  a  $55^\circ\text{C}$ .

Por lo cual el circuito de acondicionamiento tiene dos etapas tal como se muestra en la Figura 3-18, la primera corresponde al acondicionamiento del sensor con un amplificador tipo puente construido con amplificadores operacionales, y la segunda etapa es un detector de nivel que actúa como comparador. Ambos circuitos usan el amplificador operacional LF353 [59] por sus buenas prestaciones, descritas anteriormente.

**Figura 3-18:** Circuito para detección de sobre temperatura del módulo IGBT.





Cuando el usuario del generador de perturbaciones detecte en el sistema de control un estado de fallo/alarma este no podrá realizar pruebas, porque la activación de los interruptores bidireccionales es inhibida. Por lo tanto el usuario deberá hacer una inspección visual de los circuitos impresos de driver de compuerta, para determinar cuál se encuentra en “fallo”, y proceder a hacer una revisión y/o reparación si es necesario.

Una vez solucionada la causa de fallo el estado puede reiniciarse a condición normal, utilizando el circuito de RESET mostrado en la Figura 3-19. Para lo cual el usuario deberá oprimir el pulsador para este fin, cada vez que el interruptor de reinicialización es oprimido se iluminara un led indicador de color amarillo.

El circuito driver de control de compuerta de los módulos IGBT requiere de aislamiento, en la recepción de la señal de activación y en la transmisión de la señal de fallo, debido a que los interruptores bidireccionales son flotantes. Esto es porque los interruptores se encuentran ubicados en serie entre la red eléctrica/transformador ZigZag y el equipo en prueba. Si se tiene en cuenta que el propósito del generador de perturbaciones de tensión es ser usado como un equipo de prueba en laboratorio, es necesario garantizar su compatibilidad electromagnética. Esto se logra en el circuito driver mediante el acoplamiento de las señales por aislamiento óptico, más específicamente usando transmisores y receptores ópticos, y como canal de comunicación fibra óptica, tal como se muestra en la Figura 3-20.

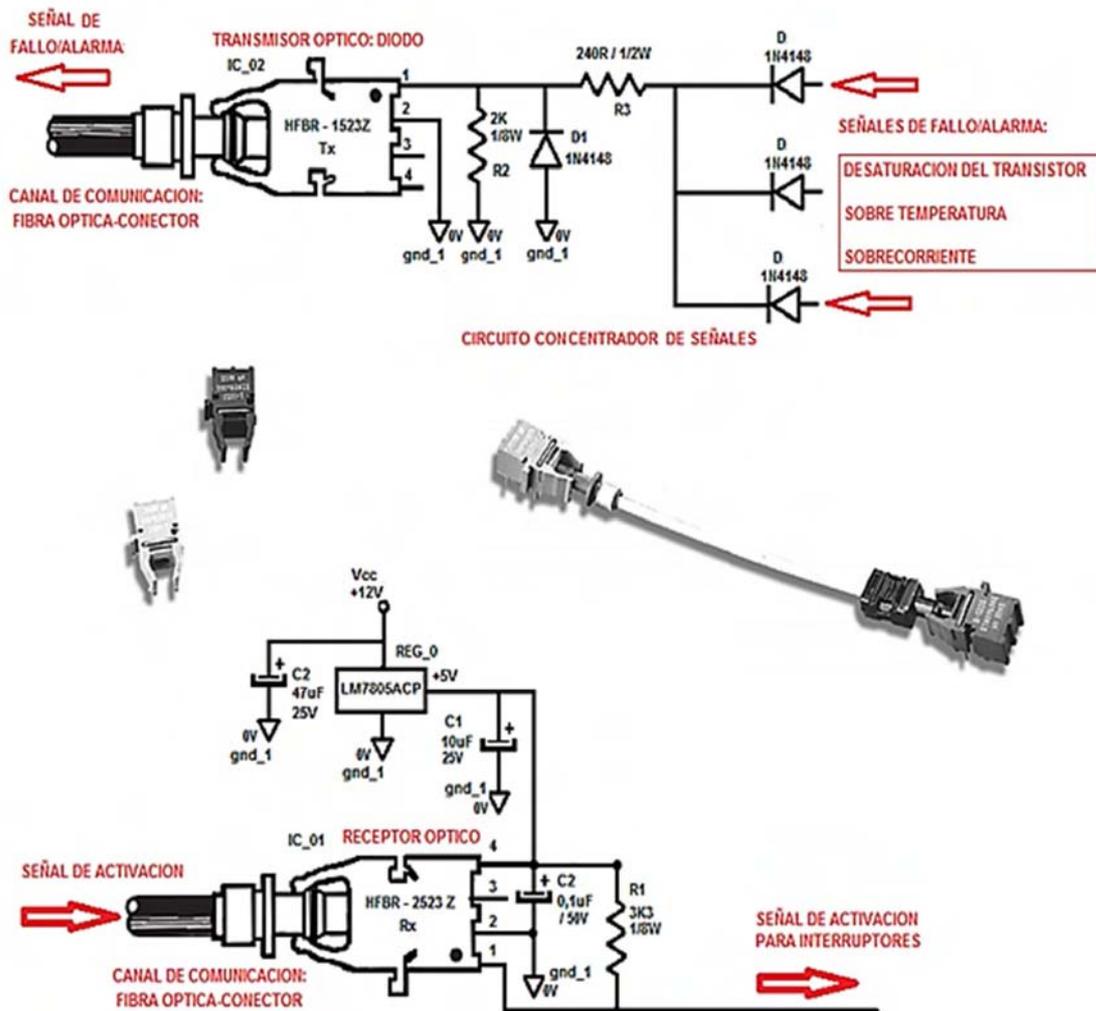
Antes del circuito transmisor es necesario concentrar las señales de fallo/alarma por desaturación, por sobrecorriente y por sobre temperatura, esto se realiza utilizando una conexión de diodos a un mismo nodo, como se puede ver en la Figura 3-20.

El transmisor óptico es de referencia HFBR1523Z [63] de Avago technologies, el cual tiene un led de 660nm. El canal de comunicación es una fibra óptica de referencia HFBR-RNS005Z [63]. Esta es una fibra plástica de 1mm, con conector de bajas perdidas, y recubrimiento plástico resistente.

La señal para la activación de los interruptores llega a través de la fibra óptica a un receptor óptico de referencia HFBR 2523Z [63]. Los receptores necesitan alimentación DC regulada y utilizan como dispositivo receptor un transistor schottky de colector

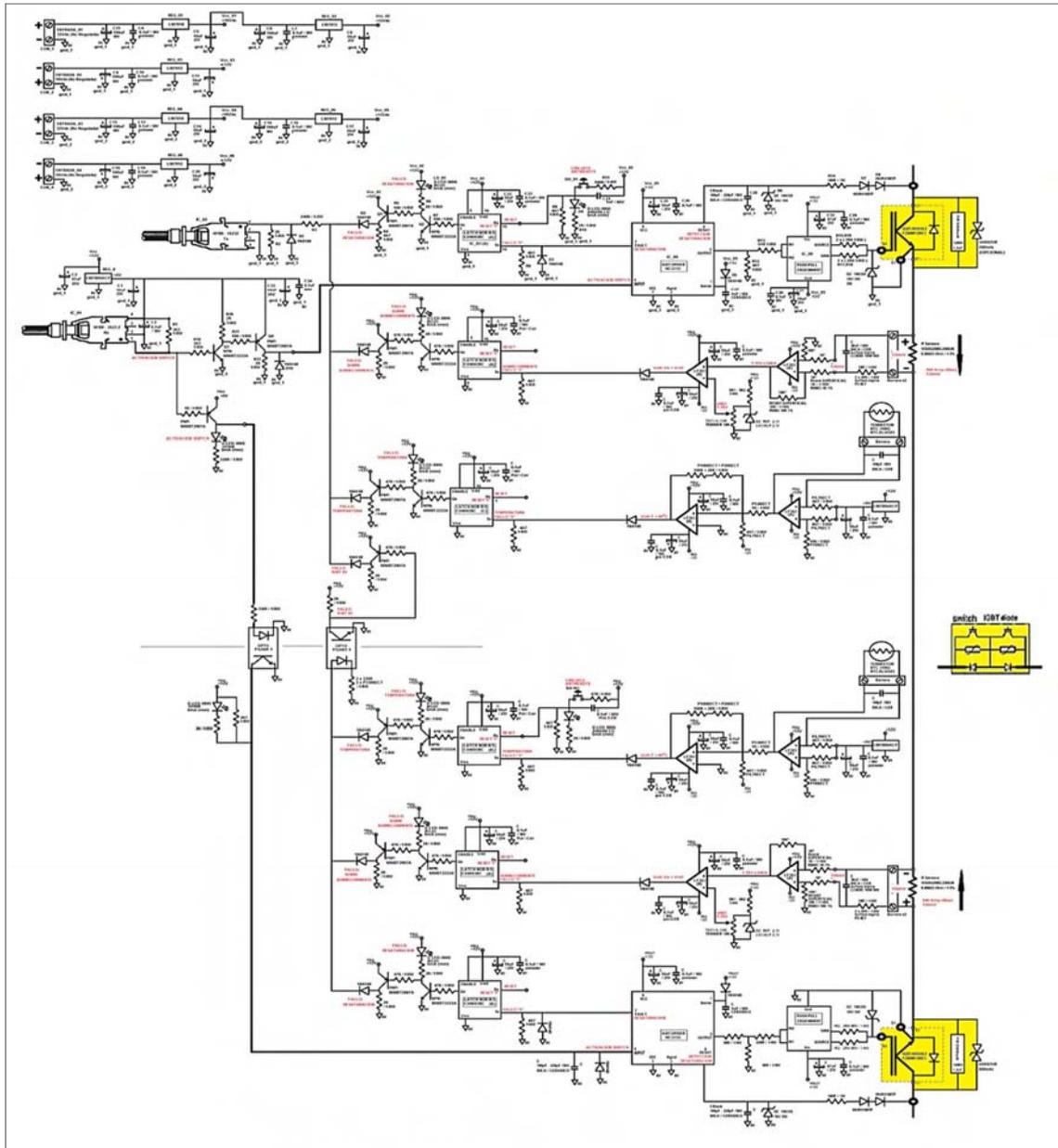
abierto, el cual requiere de una resistencia de pull-up para obtener la señal de salida, tal como se muestra en la Figura 3-20.

**Figura 3-20:** Circuitos transmisor y receptor para el aislamiento óptico de señales.



**Nota:** la fibra óptica usada es referencia HFBR-RNS005Z, AVAGO TECHNOLOGIES [63].

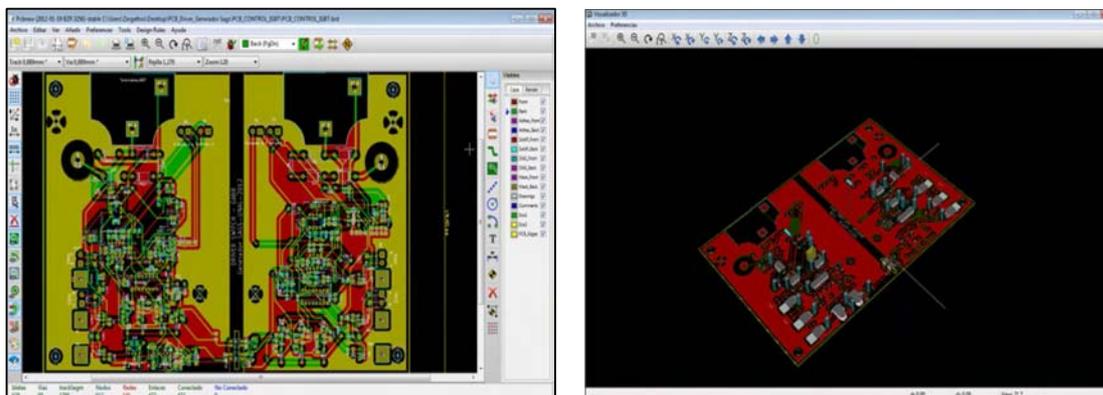
En la Figura 3-21 se presenta el diagrama esquemático completo del driver para interruptor bidireccional con IGBT's. El diseño incluye el uso de reguladores lineales en el circuito impreso, esto porque las fuentes aisladas no son reguladas. Como se mencionó anteriormente, así se mejora la regulación en la tarjeta y se disminuye el ruido conducido.

**Figura 3-21:** Esquema completo circuito driver de control de compuerta para IGBT.

En la Figura 3-22 se presenta el desarrollo del diseño de la tarjeta de circuito impreso PCB del circuito driver de control de compuerta para el módulo IGBT. Nótese que en la misma tarjeta se han integrado los dos drivers para los dos módulos IGBT que conforman un único interruptor bidireccional, en donde sus señales de activación y fallo/alarma se han acoplado ópticamente.

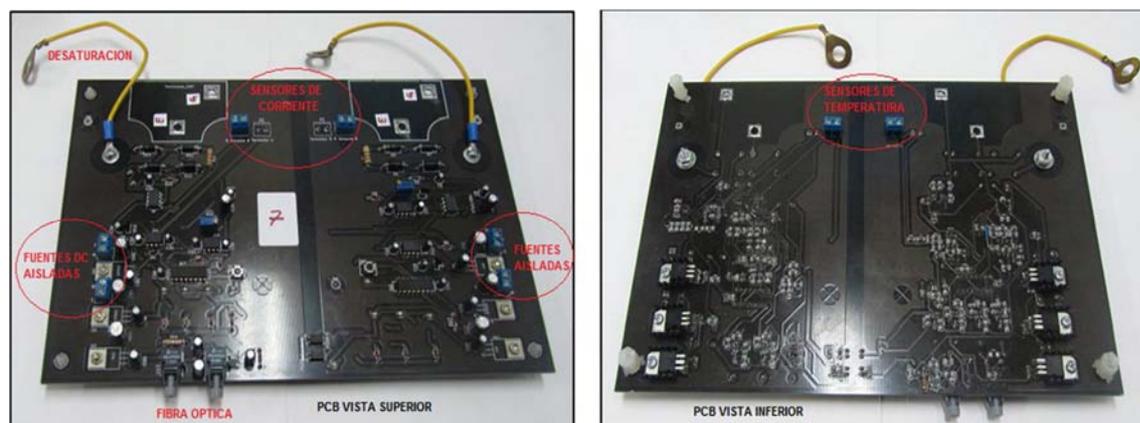
Este desarrollo fue realizado usando como plataforma el software de distribución libre KiCad (<http://www.kicad-pcb.org/>). Como puede apreciarse para diseño de la PCB se ha tenido en cuenta la forma del módulo IGBT, con el fin de que esta pueda ser asegurada directamente sobre los terminales de Base y Emisor. Así se mejora el acople de las señales, se reduce la capacitancia parasita y se disminuye el ruido.

**Figura 3-22:** Diseño PCB, Circuito driver de control de compuerta para IGBT. (KiCad)



En la Figura 3-23 se presenta el montaje de los componentes de la tarjeta PCB del circuito driver de control de compuerta para el módulo IGBT. En donde se puede apreciar el cable de conexión a colector (Drain) para el sensado de la desaturación del transistor, las borneras de conexión para: los sensores de temperatura y de corriente, y para las fuentes de alimentación aisladas, y los conectores para las fibras ópticas.

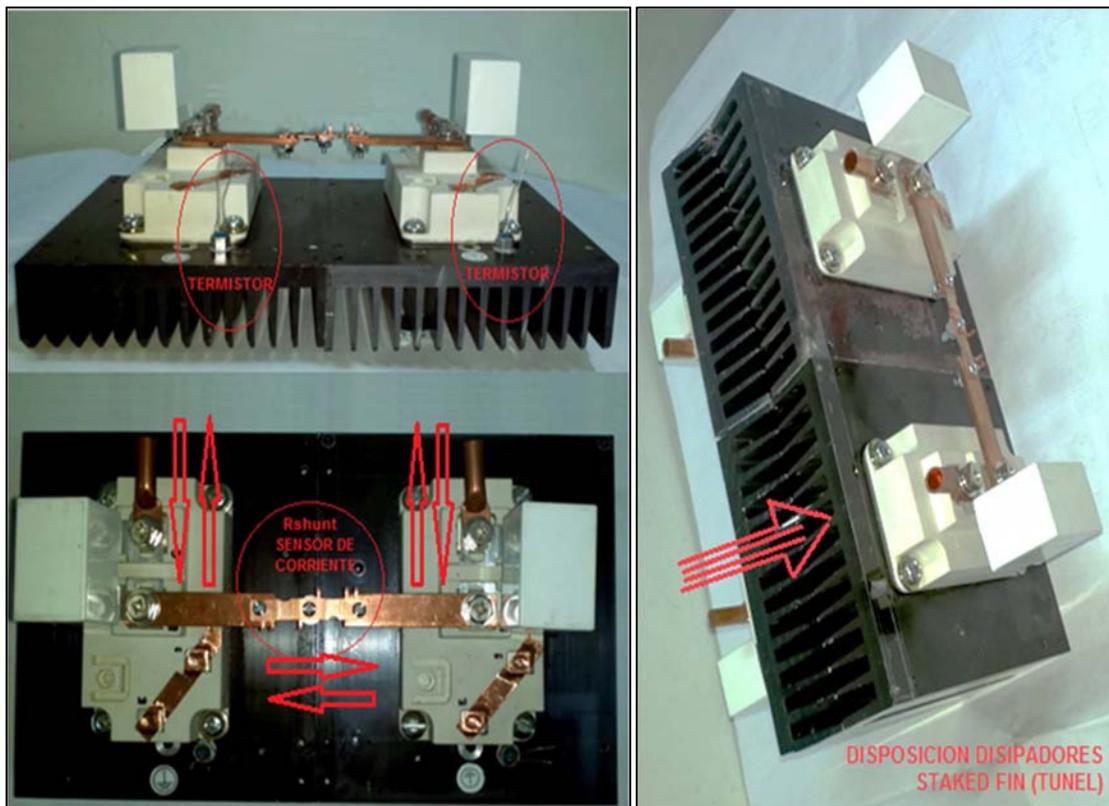
**Figura 3-23:** Montaje tarjeta PCB, Circuito driver de control de compuerta para IGBT.



### 3.5.4 Montaje del interruptor bidireccional con módulos IGBT

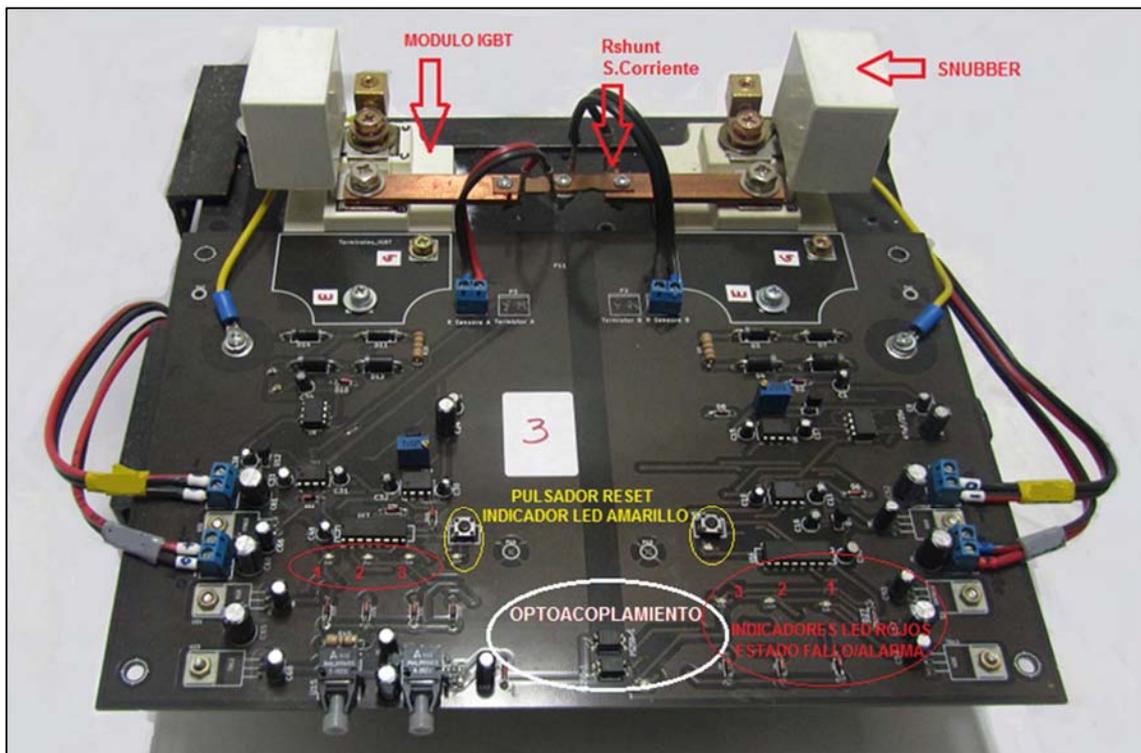
En la Figura 3-24 se presenta el proceso de montaje y construcción del interruptor bidireccional con módulos IGBT. Se puede observar que la ubicación de los sensores de temperatura es lo más cercana a los módulos IGBT, esto para una mejor medición. Las resistencias sensoras de corriente  $R_{shunt}$ , se ubican entre los dos módulos IGBT que conforma el interruptor bidireccional, mediante barrajes de cobre. Como se analizó anteriormente es necesario que el sistema de refrigeración sea de convección forzada, para optimizar el flujo de aire, se disponen los disipadores de dos interruptores bidireccionales en configuración de “túnel” o “Stacked FIN” (Nombre dado a esta configuración por el fabricante Wakefield vette, [www.wakefield-vette.com](http://www.wakefield-vette.com)), esto permitirá utilizar ventiladores pequeños. Se colocaran parejas de ventiladores de 30CFM, uno para inyección de aire a la entrada del túnel y el otro para la extracción a la salida del túnel.

**Figura 3-24:** Montaje tarjeta PCB, Circuito driver de control de compuerta para IGBT.



En la Figura 3-25 se presenta la integración de la tarjeta PCB del driver de control de compuerta, el módulo IGBT y su snubber de protección. En donde se puede apreciar claramente las conexiones de los sensores de corriente (Rshunt), las conexiones de las fuentes de alimentación, y la conexión para el senado del estado de desaturación (Cable amarillo, conexión a colector). También se puede apreciar claramente como en la tarjeta hay dos drivers de control de compuerta, uno para cada uno de los dos módulos IGBT que conforman el interruptor bidireccional, y el acoplamiento de sus señales ópticamente, nótese, que la distancia de los planos de masa no afecta el aislamiento ente los módulos.

**Figura 3-25:** Integración del circuito driver y el módulo IGBT del interruptor bidireccional.

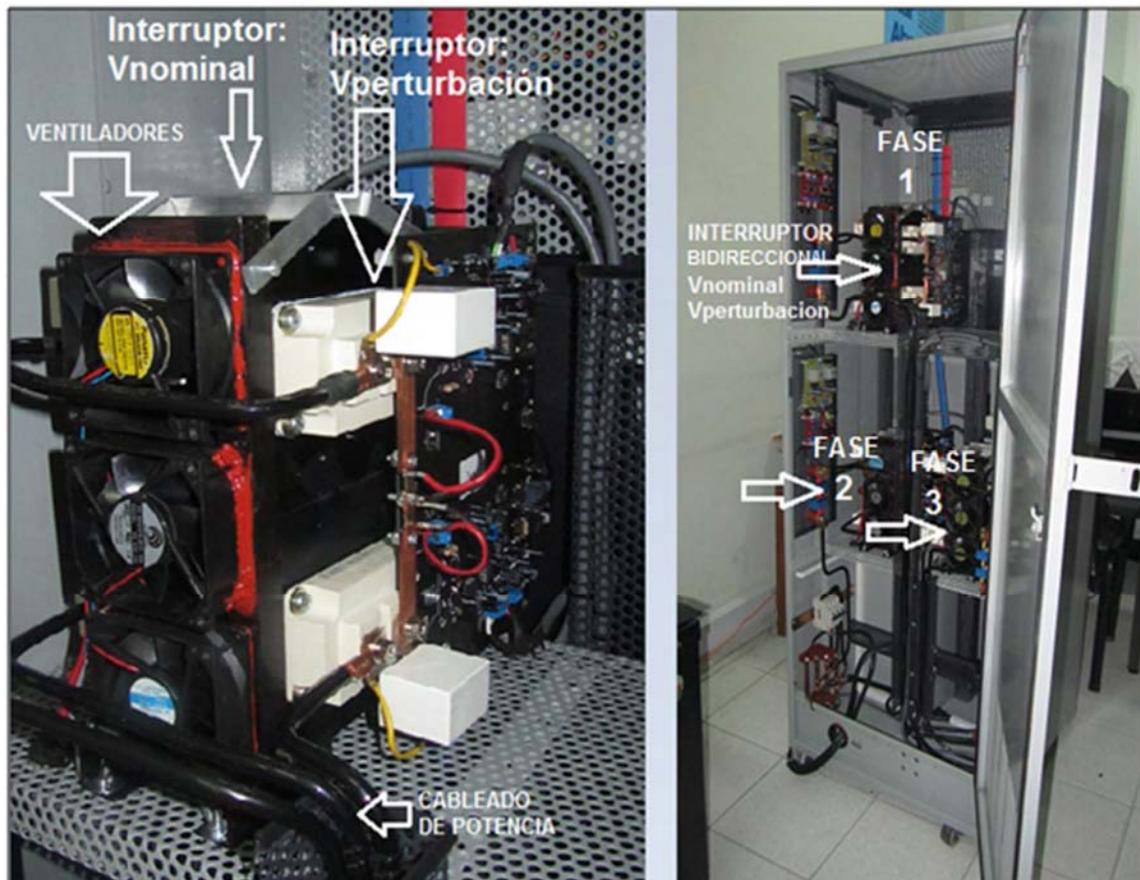


En la Figura 3-25 también se puede observar la disposición del pulsador de reset, y el led de color amarillo que indica que está siendo oprimido. Como se mencionó anteriormente la señal de reset se usa para restablecer el retenedor de estado de fallo/alarma. Así mismo, se puede observar la disposición de los indicadores leds rojos, cuya función es mostrar visualmente que hay un estado de fallo/alarma por: (1) desaturación del transistor, (2) sobrecorriente >500Amperios, (3) sobre temperatura del disipador >55°C.

Nótese que para cada driver de módulo IGBT se tiene un conjunto de estos indicadores, para que en caso de alarma el usuario pueda verificar visualmente cuál de los módulos IGBT presenta el estado de fallo y por cual razón. Esto para que pueda proceder más fácilmente a su revisión y/o reparación.

En la Figura 3-26 se presenta la instalación y ubicación de los tres interruptores bidireccionales que conforman el generador de trifásico de perturbaciones de tensión en el armario. También se puede observar la disposición del cableado de potencia y del cableado blindado de alimentación DC. En cuanto al sistema de refrigeración por convección forzada, se puede observar a disposición física de las tres parejas de ventiladores de 30CFM c/u. Nótese que los disipadores están asegurados a la estructura del armario de tal forma que están directamente aterrizados a la masa del equipo.

**Figura 3-26:** Integración del interruptor bidireccional en el equipo generador trifásico de perturbaciones de tensión.

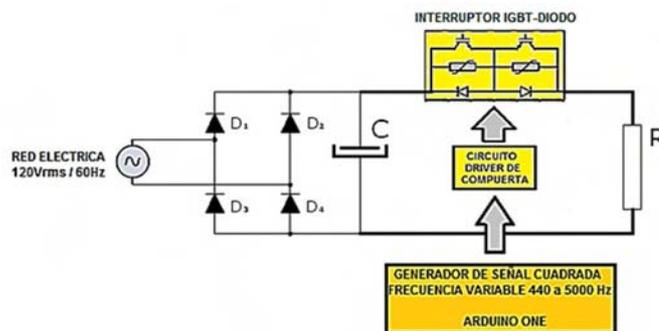


### 3.5.5 Pruebas de funcionamiento de los Interruptores bidireccionales IGBT

Antes de integrar todas las etapas y componentes del generador se realizaron pruebas de funcionamiento al interruptor bidireccional basado en módulos IGBT, para verificar su conmutación, tiempo de respuesta y correcta saturación. También, dado que el driver del interruptor IGBT tiene las protecciones contra sobrecorriente, desaturación del transistor y sobre temperatura estas se probaron.

Para probar el funcionamiento del interruptor bidireccional de potencia basado en módulos IGBT se implementó el circuito mostrado en la Figura 3-27, en donde el condensador es de valor  $930\mu\text{f}/1000\text{V}$  (conformado por 2 condensadores en paralelo:  $330\mu\text{f}/400\text{V}$ ,  $600\mu\text{f}/600\text{V}$ ), la carga resistiva es una bombilla incandescente de  $60\text{W}/120\text{Vrms}$ .

**Figura 3-27:** Circuito de prueba de conmutación para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.

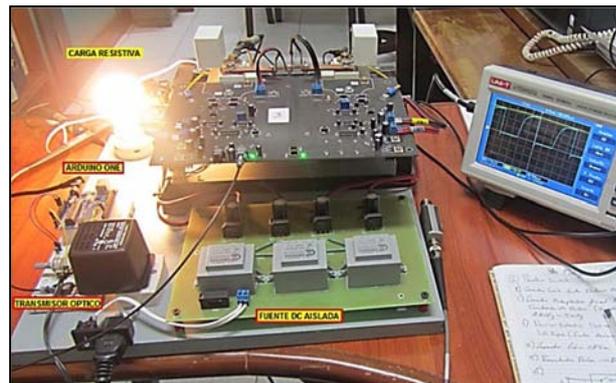


En la Figura 3-27 se presenta el montaje en físico empleado para la prueba de funcionamiento del interruptor bidireccional basado en IGBT, en donde se ha utilizado una tarjeta Arduino ONE programada para generar una señal de prueba variable entre 440 Hz y 5Khz (cuadrada de ciclo útil 50%), esta señal se presenta en la Figura 3-29. Para la prueba se usó una señal de 440Hz. La señal de control se envía por fibra óptica, utilizando un transmisor óptico conectado a la salida digital de la tarjeta Arduino ONE.

Nótese en la Figura 3-28 la conexión de la fibra óptica y los leds de color verde en la tarjeta driver indicando el estado de la señal de activación (ON).

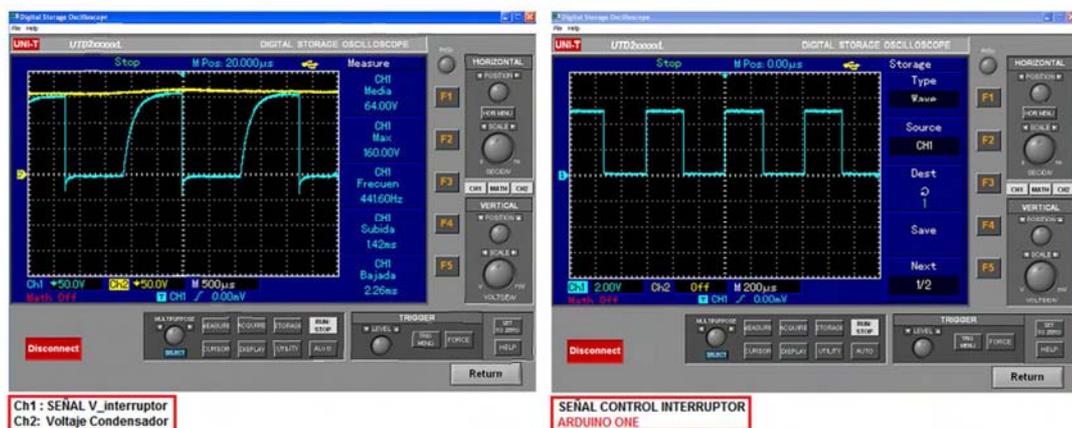
Se utiliza un osciloscopio de referencia UNIT-T UTD2052CL (50Mhz) para visualizar la señal de voltaje sobre el interruptor (señal de color Azul), y el voltaje del bus DC sobre el condensador (señal de color Amarillo).

**Figura 3-28:** Montaje de prueba de conmutación para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.



Estas señales se presentan en la Figura 3-29 en donde se puede apreciar que el interruptor se cierra rápidamente y en estado completamente saturado puesto que su caída de tensión es casi cero voltios (esto es por la escala de tiempo y de voltaje), en donde la información obtenida es consistente con la nota de aplicación que indica que el dispositivo debe tener un tiempo de activación típico de  $0,6\mu\text{seg}$  [51], y una caída en directo típica de 1,65 a 2 Voltios.

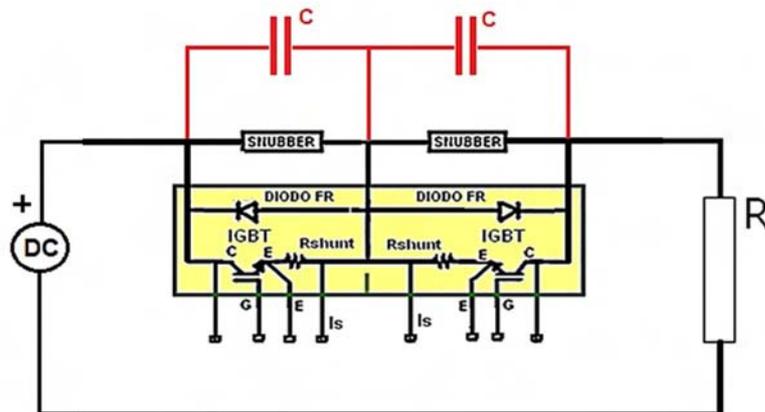
**Figura 3-29:** Resultados de la prueba de conmutación y funcionamiento para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.



Cuando se quita la señal de activación el interruptor se apaga, y este debe comportarse idealmente como un circuito abierto, y entre sus terminales debe aparecer el voltaje thevenin correspondiente al voltaje del bus DC (160Vdc). Es importante notar que cuando se le ordena al interruptor abrirse el voltaje entre sus terminales tiene un crecimiento exponencial y es relativamente lento, como puede apreciarse en la Figura 3-29.

Este comportamiento del interruptor bidireccional no corresponde al módulo IGBT, puesto que el tiempo de conmutación del mismo es muy rápido, y según la nota de aplicación su tiempo de apagado típico es de  $0,83\mu\text{seg}$  [51]. Haciendo un análisis del interruptor, este apagado aparentemente lento es debido a la componente capacitiva del snubber de protección ( $C_{\text{snubber}}$ ), conectado en paralelo y al valor de la resistencia de carga ( $T=RC$ ). Dando como resultado el modelo que se muestra en la Figura 3-30.

**Figura 3-30:** Modelo del interruptor bidireccional IGBT y los Snubber de protección.



Como se mencionó anteriormente el snubber tiene una capacitancia de  $1,2\mu\text{f}$  y la carga resistiva usada es una bombilla incandescente de 60W, lo cual explica que la respuesta exponencial sea lenta. Se espera que para cargas mayores ( $R \ll$ ) la constante de tiempo será más pequeña y el interruptor parecerá tener una mejor respuesta.

Es importante destacar que en el modelo presentado en la Figura 3-30, en la activación de los módulos IGBT estos se saturan: “cortocircuitan”, descargando a través de ellos el

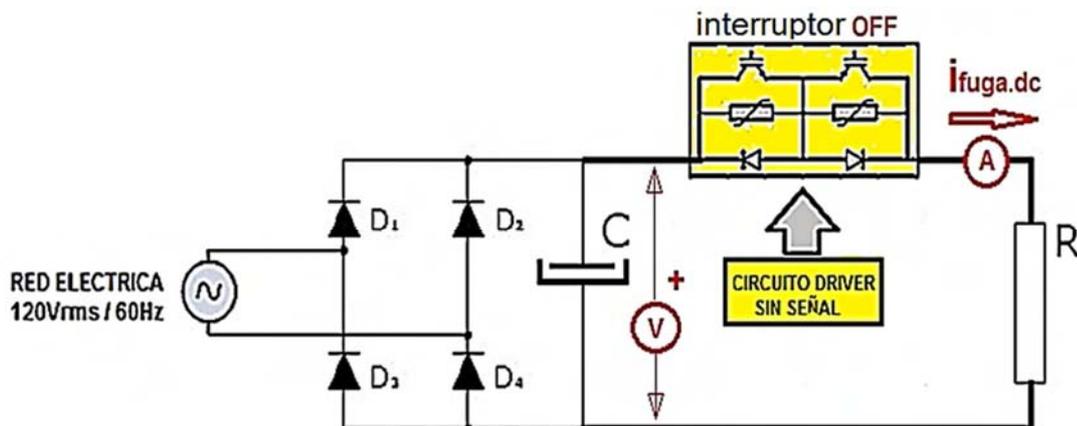
condensador equivalente, y dado que su resistencia en saturación es pequeña la respuesta es muy rápida, por lo cual el efecto solo está presente en el apagado.

Es recomendable no eliminar y/o modificar los snubbers puesto que son elementos de protección contra variaciones rápidas del voltaje ( $dV/dt$ ), y su efecto indeseado en el apagado del interruptor se presentara solo para cargas muy pequeñas ( $R \gg$ ).

Un efecto indeseado que se presentó en las pruebas del generador de perturbaciones de tensión, es que con cargas muy pequeñas como los son las bombillas LFC estas no se apagan completamente, esto implicaría que existe una corriente de fuga apreciable para este tipo de cargas. Por lo tanto, para probar bombillas fluorescentes compactas LFC se recomienda el uso de una bombilla incandescente en paralelo.

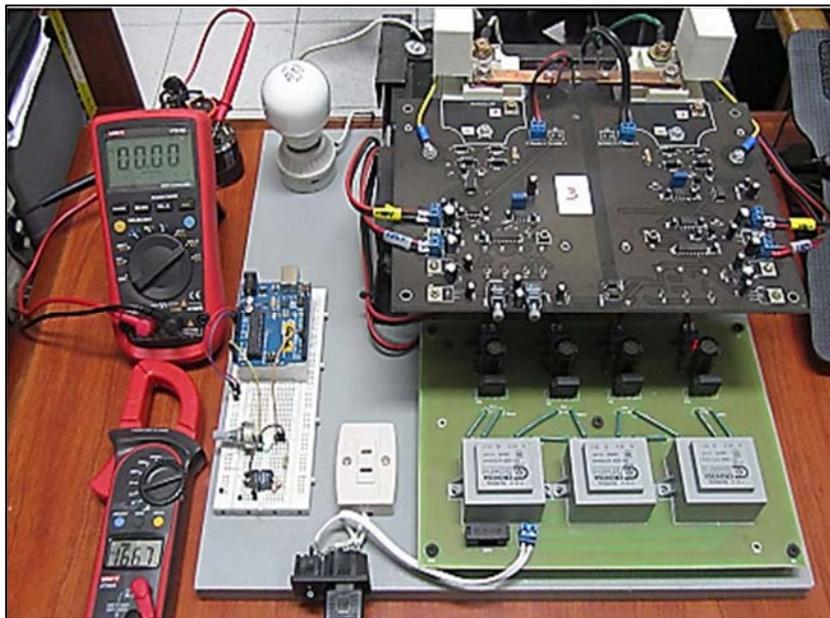
En la nota de aplicación del módulo IGBT FZ600R12KE3 [51] no se especifica claramente esta corriente en función de las características del diodo y el transistor IGBT, la única referencia es acerca de la corriente cut-off Máxima de valor 5mA [51], pero este valor de corriente no explicaría el fenómeno. Para analizar el fenómeno es mejor medir experimentalmente la corriente de fuga en DC y AC, para ello se emplean los circuitos presentados en las Figuras [3-31 y 3-33].

**Figura 3-31:** Circuito de prueba de medición de corriente de fuga en DC para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.



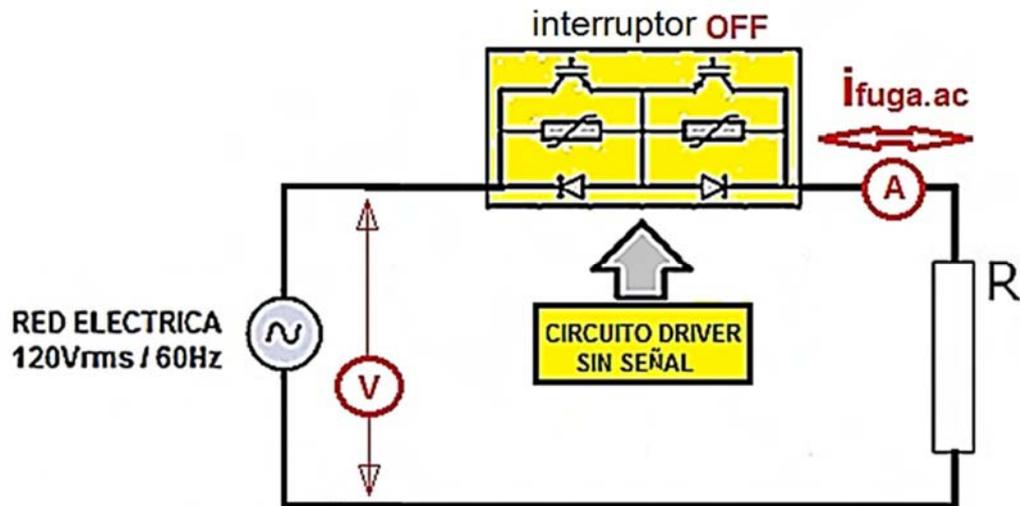
En el circuito de la Figura 3-31, se utiliza un rectificador y un filtro con condensador (usado anteriormente de valor:  $930\mu\text{f}/600\text{V}$ ). Para generar un bus DC de  $166,7\text{Vdc}$  como se muestra en el voltímetro de la Figura 3-32. Como carga se usa una bombilla incandescente de  $60\text{W}$ . Se utiliza un amperímetro en serie al interruptor para medir la corriente de fuga DC, tal como se muestra en la Figura 3-32. El interruptor no recibe señal de activación (fibra óptica: desconectada), y el resultado es que no hay corriente de fuga en DC medible con el instrumento. Esto indica que la corriente de fuga no depende del modelo DC del interruptor, ósea que la resistencia en el estado de apagado del interruptor es muy alta, lo que indica que este se está adecuadamente en “corte”.

**Figura 3-32:** Montaje y Resultados de la prueba de medición de corriente de fuga en DC para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.



En la Figura 3-33 se presenta el circuito experimental usado para medir la corriente de fuga en AC del interruptor bidireccional basado en módulos IGBT. Para ello se conecta directamente el interruptor a la red eléctrica de  $120\text{Vrms}/60\text{Hz}$ , Primero se usa como carga una bombilla incandescente de  $60\text{W}$  que parece no verse afectada por el interruptor. Segundo se usa como carga una bombilla LFC que claramente es afectada por el interruptor. Y se procede a medir la corriente de fuga en AC con un amperímetro en serie al interruptor, mientras el interruptor no recibe señal de activación.

**Figura 3-33:** Circuito de prueba de medición de corriente de fuga en AC para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.



En la Figura 3-34 se presenta el montaje y resultados de la prueba de medición de corriente de fuga AC del interruptor bidireccional basado en módulos IGBT. En la izquierda se puede ver como la bombilla LFC se ilumina parcialmente cuando debería estar apagada, esto es porque la corriente de fuga AC (RMS) medida es de 23,55 mA. En la derecha se presenta la prueba con la bombilla incandescente de 60W, la corriente en este caso es de 40,65mA. La bombilla incandescente no se ilumina porque esta corriente es muy pequeña para este tipo de carga, aunque si existe corriente de fuga.

**Figura 3-34:** Montaje y resultado de la prueba de medición de corriente de fuga en AC para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.



Es claro que la corriente de fuga se presenta solo en AC. La corriente obtenida experimentalmente es relativamente pequeña (23 – 40 mA) y es dependiente del tipo de carga. Haciendo un análisis del comportamiento en DC y AC es claro que esto también es producido por el modelo del interruptor mostrado en la Figura 3-30, en donde la capacitancia de los snubber permite la circulación de una corriente en AC, dado que:

$$I_{fuga(ac)} = \frac{V_{fuente(ac)}}{X_C + R} \quad (4.1)$$

Es importante notar que esta corriente de fuga solo afecta cargas muy pequeñas como los son las bombillas LFC, por esto es recomendable al probar bombillas LFC conectar una resistencia en paralelo que drene la corriente, como una corriente de sangría, en este caso se recomendaría escoger experimentalmente el valor de la resistencia.

Como se mencionó en este capítulo, el circuito driver de control del interruptor bidireccional basado en módulos IGBT tiene tres tipos de protección:

- Desaturación del transistor.
- Sobrecorriente.
- Sobre temperatura.

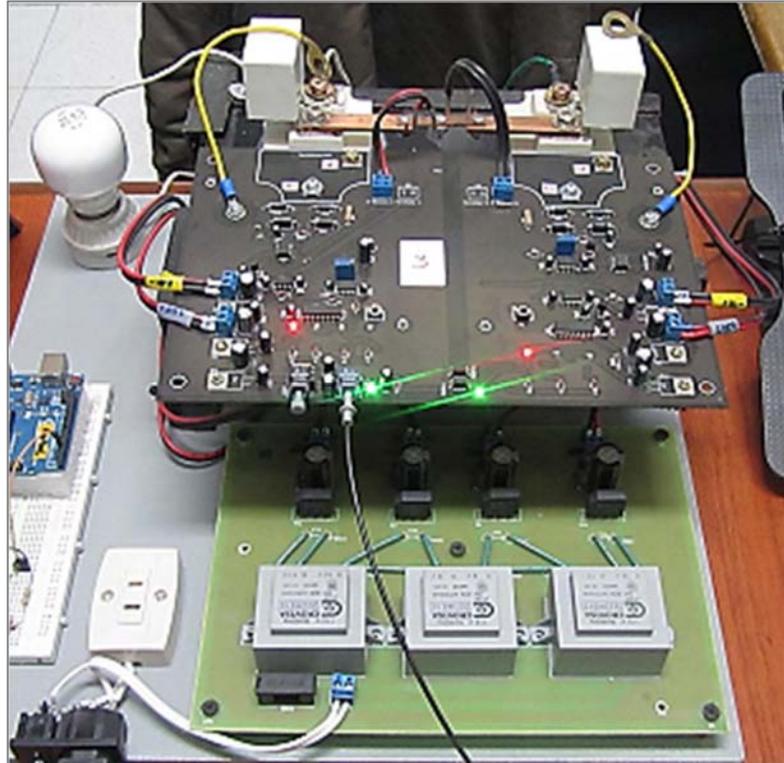
Para probar el funcionamiento de estas protecciones se hace necesario utilizar el circuito de prueba para los interruptores, mostrado anteriormente en la Figura 3-31.

Específicamente, para probar la protección de desaturación del transistor es necesario desconectar los cables que van al colector de los módulos IGBT (en color amarillo), tal como se muestra en el montaje de la Figura 3-35, y luego enviar al interruptor la señal de activación. Recordando el funcionamiento del circuito de protección de desaturación, este busca detectar el estado en que a pesar de que se tenga señal de activación, el voltaje en el colector no descienda al valor esperado del voltaje de saturación  $V_{ce,sat}$  [56].

En la Figura 3-35 se puede observar que la señal de activación es recibida por el driver de control del interruptor al encenderse los indicadores led de color verde, y puede verse actuar la protección de desaturación, puesto que los led de estado de fallo de color rojo

se encienden, y la carga que es una bombilla incandescente no se ilumina por que la protección de desaturación por seguridad inhibe la activación de los transistores [56].

**Figura 3-35:** Montaje y resultado de la prueba de la protección de desaturación del transistor para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.



Otra protección que tiene el driver de control de los módulos IGBT es la detección de sobrecorriente, esta se realiza sensando la corriente que pasa por una resistencia de valor  $0,00025\Omega$  [58] en serie a cada módulo IGBT, amplificando y comparando con una referencia.

Para probar que esta protección funciona se podría ajustar una carga hasta hacer circular la corriente necesaria, pero en el laboratorio no se tiene el equipamiento y las protecciones necesarias para esta prueba. Por lo cual es más fácil simular el voltaje de activación de la protección, se reemplaza el voltaje de caída de tensión sobre la resistencia sensora desconectándola tal como se muestra en la Figura 3-36, y conectando entre los terminales del circuito driver una fuente de voltaje variable.

**Figura 3-36:** Montaje y resultado de la prueba de la protección de sobrecorriente para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.



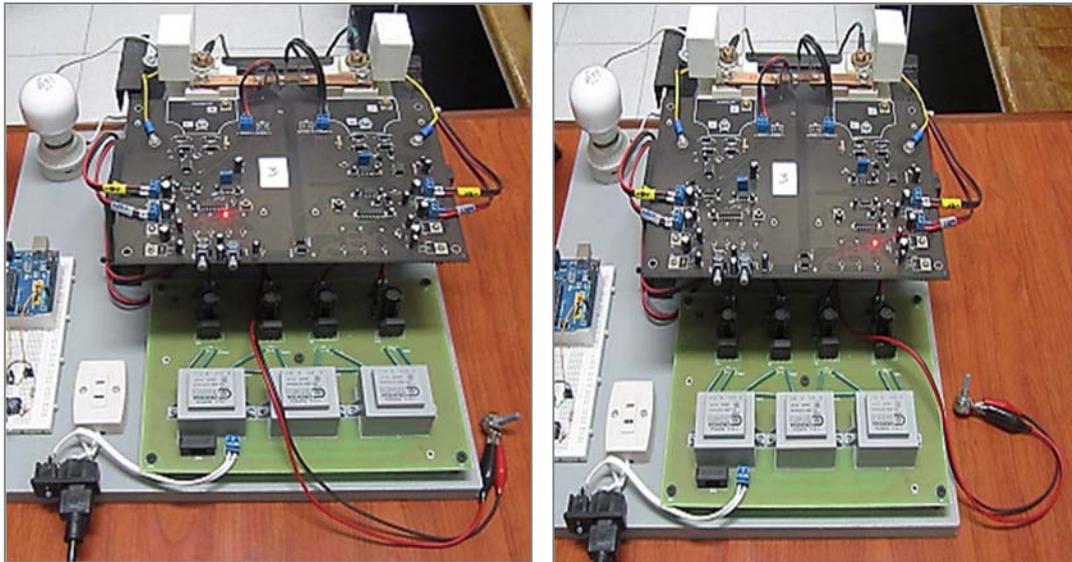
En la Figura 3-36 la fuente variable se conecta a través de un divisor de tensión  $\times 1/100$  debido a que el voltaje necesario para la prueba es muy pequeño. Se varía el voltaje de la fuente de forma creciente hasta que el circuito driver active la protección. Esto se percibe visualmente al encenderse el led rojo de fallo por sobrecorriente. En la prueba de la Figura 3-36 la fuente se varia hasta alcanzar 13,18V y lograr la activación de la protección, este voltaje de la fuente coloca en la entrada del circuito de protección 131,8mV, lo que representaría una corriente de 527,5Amperios ( $131,8\text{mV}/0,00025\Omega$ ).

Según la norma usada el interruptor debe soportar un pico inrush de 500 Amperios, lo que quiere decir que la protección no debe afectar el funcionamiento del interruptor en virtud de la normatividad [8]. Por otra parte, los módulos IGBT soportan hasta 1200 Amperios a 25°C, y 600 Amperios a 150°C [51], lo que quiere decir que la protección a 527,5 Amperios es adecuada. Aunque según el diseño de la protección se realizó para una corriente de 540 Amperios, la diferencia obedece a los efectos de las tolerancias en el circuito, y no afecta el objetivo de esta protección, que debe estar obligatoriamente entre 500 Amperios y 600 Amperios.

En la Figura 3-37 se presenta la prueba de protección de sobre temperatura, esta prueba se realiza simulado la entrada del circuito de protección. Esto es porque no es posible realizar la prueba en el laboratorio aplicando calor de forma controlada a los disipadores.

Para simular el funcionamiento del sensor de temperatura (NTC, 10K $\Omega$ ) [60] este se reemplaza con un potenciómetro de 20K $\Omega$ . Este potenciómetro se varía decrecientemente hasta que la protección se active.

**Figura 3-37:** Montaje y resultado de la prueba de la protección de sobre temperatura para el interruptor bidireccional basado en módulos IGBT.



En la Figura 3-37 se muestra como se ha instalado el potenciómetro en reemplazo del termistor NTC [60] y se ha disminuido su valor hasta hacer activar la protección. La activación de la protección se percibe visualmente por el encendido de los leds indicadores de color rojo. Luego de producirse la activación de la protección el potenciómetro se retira, y es medida su resistencia utilizando un óhmetro. Este valor se compara con la información en la tabla característica del termistor NTC incluida en su nota de aplicación [60].

Para el primer módulo IGBT el valor medido en el potenciómetro de prueba es de 2873 $\Omega$ , y para el segundo módulo IGBT el valor medido en el potenciómetro de prueba es de 2902 $\Omega$ . Comparando con la nota de aplicación ambos circuitos están funcionando adecuadamente, con un par de sensores en buen estado las protecciones se activan entre 53 $^{\circ}\text{C}$  y 54 $^{\circ}\text{C}$ , lo cual da cumplimiento las especificaciones del diseño incluidas en el presente capítulo.

## RESUMEN CAPITULO

Este capítulo inicia haciendo una revisión de la información analizada en los capítulos 1,2,3, y los criterios que determinaron la topología escogida para el diseño del generador de perturbaciones: **“Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador por conmutación de taps”**. Basándose en esto se plantea la arquitectura del generador y se presenta en las Figuras 3-1 y 3-2.

Se determinan las siguientes etapas o módulos para el diseño e implementación del generador de perturbaciones de tensión: Tablero de mando, protecciones, fuentes de alimentación, Transformador Trifásico Zig-Zag, etapa de potencia: interruptores IGBT bidireccionales, módulo de instrumentación y acondicionamiento de señales, y módulo de control e interfaz GUI- HMI.

En el capítulo se presenta el diseño, e implementación de las etapas de Tablero de mando, protecciones, y fuentes de alimentación, en donde se especifica claramente sus alcances y limitaciones actuales, determinadas fundamentalmente por razones de tipo económico. Se exponen los problemas actuales y plantean recomendaciones para mejoras dependientes de la disponibilidad de futuros recursos. A pesar de esto, se ha construido un equipo teniendo en cuenta la protección del mismo, criterios de compatibilidad electromagnética y un adecuado diseño de aislamientos, apantallamientos y tierras (masa).

Dado que la topología escogida corresponde a un **“Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador por conmutación de taps”**, y dado que se desea que el equipo genere no solo hundimientos e interrupciones de tensión (Objetivo Principal). Sino que se desea adicionalmente, la generación de elevaciones de tensión, y algunas fluctuaciones de tensión se deciden utilizar un transformador tipo Zig-Zag.

Después de revisar y analizar los tipos conexión de transformadores Zig-Zag, se escoge la conexión Yz6, donde los 3 devanados primarios se conectan en estrella y los 6 devanados secundarios quedan disponibles para conexión en estrella, se escoge por criterios de compatibilidad electromagnética y disponibilidad de conexión a neutro.

De acuerdo a las normas revisadas en el capítulo 1, se analizaron los voltajes de tap del transformador Zig-Zag necesarios para el cumplimiento de dichas normas, este análisis esta condensado en la Tablas 3-6, 3-7 y 3-8, y se procede a especificar el transformador. En la realimentación realizada con el fabricante de transformadores se determina que constructivamente la realización del mismo solo es posible para seis devanados secundarios (dos por fase), con taps con voltajes cada 5%. Esto determina que la generación de fluctuaciones “Flicker” no cumplirá ninguna norma revisada y solo servirá para  $\Delta V = \pm 5\%$  o  $\pm 10\%$ . El transformador es adecuado, puesto que el objetivo del generador no es la generación de fluctuaciones y tampoco el cumplimiento de normas para estos.

En este capítulo se hace un análisis de la etapa de potencia basada en un interruptor IGBT bidireccional basado en FZ600R12KE3, y se plantea una arquitectura apropiada para su diseño e implementación, como se ilustra en la Figura 3-12. Basado en esta arquitectura se diseña un driver de control de compuerta para IGBT aislado, y el acoplamiento de las señales de control se realiza por fibra óptica. Se escoge en el interruptor IGBT la protección contra sobretensiones con snubber C4BSPBX4120ZBJJ, porque es más seguro que usar Varistorés.

Se diseña el driver de control de compuerta con tres tipos de protección contra: sobrecorrientes ( $540 A_{pico}$ ), sobre temperatura ( $55^{\circ}\text{C}$  en el disipador) y desaturación de transistor IGBT. Adicionalmente, se diseña el circuito de disipación de potencia y se determina que este debe ser de convección forzada tipo “stacked FIN” porque en el peor caso la disipación de potencia es muy alta. Se implementan los interruptores y sus respectivos driver y se realizan pruebas para validar su funcionamiento. Como resultado de estas pruebas, las protecciones se calibran y validan, y se demuestra que el funcionamiento del interruptor es satisfactorio.

Se determina que una consecuencia del uso de snubber capacitivo es la existencia de una corriente de fuga AC entre 25-40mA, esto es importante solo para cargas muy pequeñas y deberá tenerse en cuenta en la prueba de estas.

## **4. Sistema de control, Interfaz HMI-GUI y módulos de instrumentación**

El diseño del sistema de control para el generador permitirá la programación de las diferentes pruebas de inmunidad. Para que el sistema de control funcione adecuadamente este no solo deben tener módulos de instrumentación de voltaje y corriente (Medición y acondicionamiento de señales), sino que debe incluir también módulos de sincronismo con la red, módulos de acondicionamiento de señales digitales de control, y adquisición de señales DAQ.

El sistema de control debe tener la suficiente velocidad, memoria, y capacidad de procesamiento, porque debe registrar y almacenar la información de las señales del equipo en prueba (EUT) obtenidas del módulo de sistema de medición e instrumentación en una prueba. El diseño del módulo de la interfaz gráfica hombre-máquina (GUI-HMI) debe permitir el ingreso de la información de la prueba, visualizar la información de las señales obtenidas del equipo en prueba (EUT), y el registro de los datos de la prueba en algún tipo de archivo de salida para su posterior procesamiento.

La necesidad de tener un control de disparo de los interruptores de potencia IGBT en cada ciclo de funcionamiento, y al mismo tiempo realizar las tareas de registro/almacenamiento de los valores de las corrientes y voltajes durante una prueba, hace que sea imposible utilizar solo una plataforma de procesamiento.

Por lo tanto, el sistema de control se divide en dos módulos principales: el primer módulo está basado en una tarjeta microcontrolada Arduino sobre la que se hace el control de los interruptores de potencia IGBT durante la prueba.

El segundo módulo del sistema de control está basado en un PC y software Labview que soporta la interfaz GUI-HMI para la programación de la prueba previo a la realización de la misma, y el registro y presentación de los datos durante la prueba.

## **4.1 Módulos de medición y acondicionamiento de señales analógicas de corriente y voltaje**

EL generador trifásico de perturbaciones de tensión requiere la medición de variables analógicas de voltaje y corriente en la carga o equipo en prueba (EUT) por cada fase. Es importante tener en cuenta que al efectuar la medición de estas variables no debe afectarse el aislamiento de las etapas de potencia del equipo, ni su compatibilidad electromagnética. Los parámetros más importantes para escoger los sensores serán: rango, linealidad, precisión, forma de onda DC y AC, tiempo de respuesta, ancho de banda, aislamiento y costo.

### **4.1.1 Módulo de medición de corriente**

Para la medición de corriente es posible utilizar diferentes métodos como resistencias shunt, bobinas de Rogowski, transformadores de corriente, y sensores de efecto hall. En todos estos métodos se pueden encontrar sensores que satisfagan los requerimientos de rango, linealidad y precisión, pero parámetros como: forma de onda DC y AC, tiempo de respuesta, ancho de banda, aislamiento, y un costo asequible para la aplicación, solo pueden ser cumplidos utilizando sensores de efecto hall.

Los sensores de efecto hall tienen dos grandes ventajas por principio de funcionamiento; tienen aislamiento eléctrico puesto que miden la corriente indirectamente por el campo magnético producido y pueden medir corrientes DC y AC. Las especificaciones de los sensores de corriente de efecto hall escogidos se presentan en la Tabla 4-1. Las características de exactitud y linealidad de  $\pm 1\%$  no se escogen menores porque se requerirían sensores muy costosos. La velocidad de respuesta y ancho de banda son apropiados.

**Tabla 4-1:** Especificaciones requeridas para la medición de corriente. [64] [65]

PARÁMETRO		VALOR	HAS200S*	HAS600S*
RANGO $I_{pico}$	$I_{max, trabajo} = 50A_{rms}$	0-142 A	0-200 A (Región lineal)	0-600 A (Región lineal)
RANGO $I_{inrrush, peak}$	$I_{max, fallo} = 500A_{pico}$	0-540 A	600 A (Región No_lineal)	900 A (Región No_lineal)
PRESICIÓN/EXACTITUD	Máximo	1%	$\pm 1\%$ de $I_{pico}$	$\pm 1\%$ de $I_{pico}$
LINEALIDAD	Máximo	1%	$\pm 1\%$ de $I_{pico}$	$\pm 1\%$ de $I_{pico}$
FORMA DE ONDA		DC y AC	DC y AC	DC y AC
TIEMPO DE RESPUESTA	Máximo	16 $\mu$ seg	3 $\mu$ seg	3 $\mu$ seg
ANCHO DE BANDA	Mínimo	0-6Khz	0-50Khz	0-50Khz
AISLAMIENTO	Ideal	1000V	Efecto Hall, 1000 M $\Omega$	Efecto Hall, 1000 M $\Omega$
COSTO	Asequible	\$30US	500V	500V

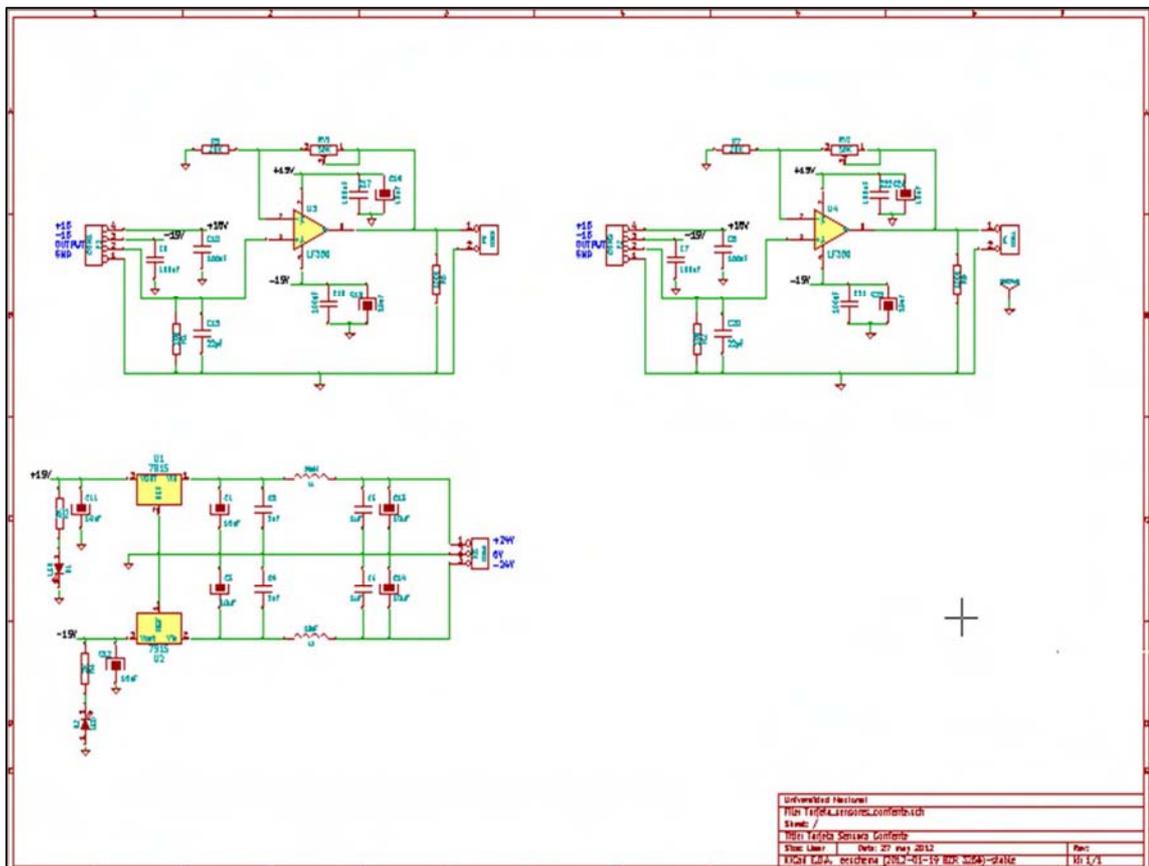
Un inconveniente tiene que ver con el rango de medición de la aplicación, puesto que para la corriente máxima de operación del equipo de  $75 A_{rms}$ , se tiene un valor de  $106A_{pico}$ , por lo cual se necesita de un sensor con un rango de  $0-110A_{pico}$ .

El sensor con el rango más cercano de referencia HAS200S de LEM USA Inc. [64] tiene un rango de  $0 - 200 A_{pico}$ , pero la corriente de fallo  $I_{inrrush, peak}$  es de  $500 A_{pico}$ , por lo cual el sensor más apropiado es el HAS600S de LEM USA Inc. [64] que tiene un rango de  $600 A_{pico}$ . El inconveniente radica en que si se decide utilizar solo el sensor de rango más amplio ( $600 A_{pico}$  en la región lineal) la sensibilidad será menor en el rango de operación normal, y si se decide utilizar el sensor de rango  $200 A_{pico}$  en la región lineal, aunque este no se dañe al ser sometido a corrientes mayores porque tiene un valor máximo de  $600 A_{pico}$  en la región no-lineal, las mediciones entre  $200 A_{pico}$  y  $600 A_{pico}$  serian cualitativas, por lo tanto, se deben usar los dos sensores al mismo tiempo.

Los sensores de efecto hall son elementos activos que requieren alimentación DC. Para los sensores escogidos la alimentación debe ser de  $15V_{dc} \pm 5\%$ , por esta razón es importante incluir en la tarjeta de acondicionamiento los reguladores de voltaje (lineales de  $\pm 15V_{dc}$ , LM7815), tal como se presenta en la Figura 4-1. La salida de los sensores es un voltaje DC proporcional a la corriente, en este caso la salida es de  $4V \pm 40mV$  (exactitud,  $\pm 1\%$ ) a plena escala de  $200A_{pico}$  y  $600A_{pico}$  respectivamente.

Es necesario un circuito de acondicionamiento de señal entre el sensor y la etapa de adquisición del sistema de control, que permita la amplificación de la señal para el aprovechamiento del rango de entrada de la etapa de adquisición que es de 10V. Se requiere de un amplificador por cada sensor de corriente, en la misma tarjeta de acondicionamiento y se requiere de tres tarjetas una por cada fase.

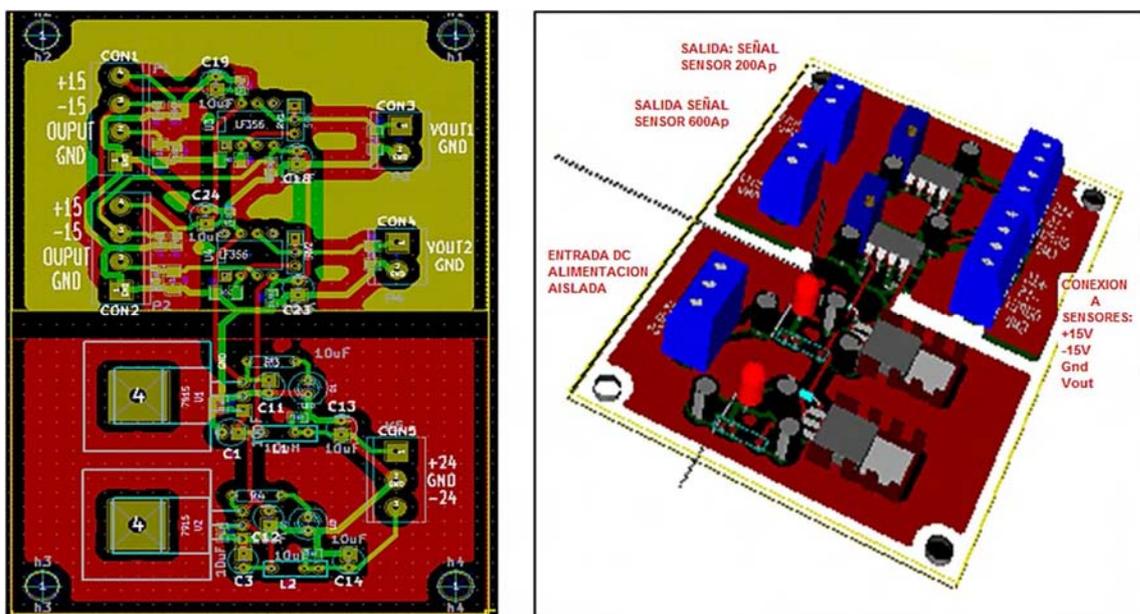
**Figura 4-1:** Diseño circuito de medición de corriente. (KiCad)



El circuito de acondicionamiento de señal con amplificador operacional presentado en la Figura 4-1, utiliza un amplificador operacional LF356 [66] de Texas Instruments. Se escoge este amplificador JFET porque tiene un voltaje de offset bajo (3mV), una corriente de offset muy pequeña (3pA), corriente de bias pequeña (30pA), y un ancho de banda grande (5Mhz). Por lo que es adecuado para la aplicación. Nótese que el amplificador tiene un trimmer para ajustar/calibrar su ganancia. Si se requiere alguna pequeña compensación de Voltaje o corriente de off-set esta se realizara por software.

En la Figura 4-2 se presenta el diseño del circuito impreso de la tarjeta de medición y acondicionamiento de corriente. Nótese la separación entre la etapa de regulación DC de la fuente de alimentación y los circuitos de acondicionamiento, este diseño en isla junto con los planos de tierra evitan ruido. El IC LF356 [66] se escoge porque tiene un solo amplificador operacional en el encapsulado, lo que evita problemas de pérdida de aislamiento y acoplamiento. Nótese que la tarjeta provee los voltajes de alimentación DC regulados ( $\pm 15\text{Vdc}$ ) para los sensores.

**Figura 4-2:** Diseño circuito impreso PCB, tarjeta de medición de corriente. (KiCad)

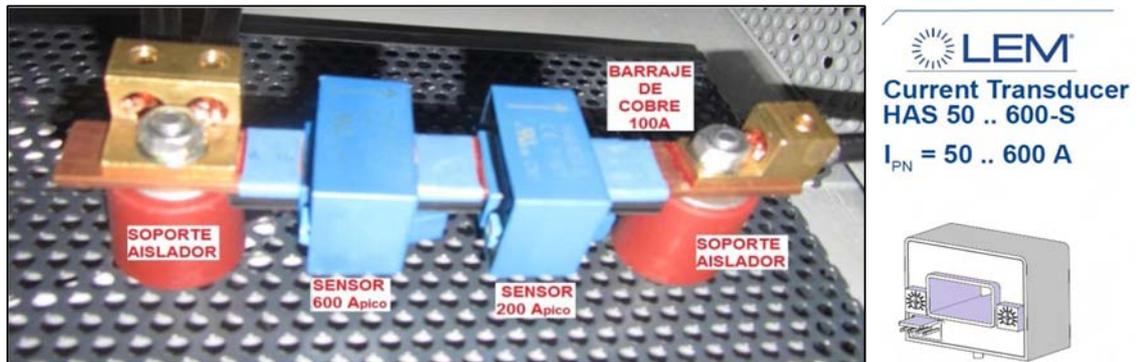


Cada módulo de medición de corriente se conforma de tres partes: los sensores, la tarjeta PCB de acondicionamiento de señales, y una fuente de alimentación aislada no regulada. En la Figura 4-3 se presenta el montaje de los sensores de corriente sobre barrajes de cobre y asegurados con aisladores eléctricos.

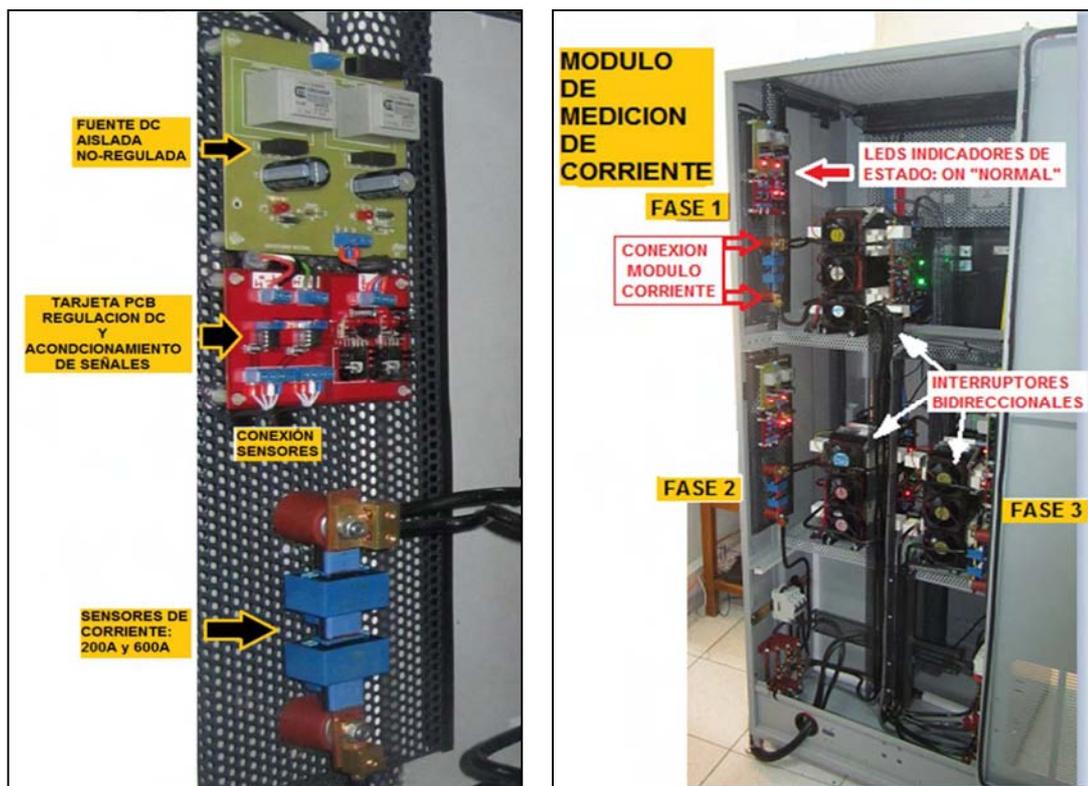
El montaje y conexión del sistema de medición de corriente en el armario del generador trifásico de perturbaciones de tensión se presenta en la Figura 4-4, en donde se puede ver como se asegura al equipo la tarjeta fuente de alimentación aislada no regulada, la tarjeta PCB de medición de corriente y los sensores. Nótese que la conexión entre la tarjeta de acondicionamiento y los sensores se realiza por debajo de la lámina metálica de soporte y blindaje, lo cual evita la contaminación de las señales.

En la Figura 4-4 se puede observar la disposición de cada módulo de medición de corriente y su conexión en serie con el interruptor bidireccional para cada fase.

**Figura 4-3:** Montaje de los Sensores de medición de corriente.



**Figura 4-4:** Montaje del sistema de medición de corriente.



Adicionalmente, la tarjeta de fuente de alimentación DC y la tarjeta de acondicionamiento de señal tienen indicadores led para que un usuario pueda verificar su estado normal.

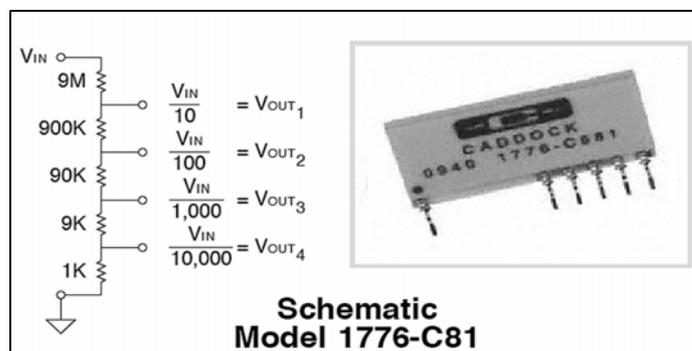
### 4.1.2 Módulo de medición de voltaje

El generador trifásico de perturbaciones de tensión requiere la medición del voltaje nominal y del voltaje en la carga o equipo en prueba (EUT), para cada fase. Dado que el sistema trifásico para el cual se ha diseñado el generador de perturbaciones tiene un Voltaje nominal fase-neutro de 120Vrms/60Hz, el rango de medición para las entradas de voltaje nominal sería  $>170V_{pico}$ , como criterio de diseño se toma  $0-200V_{pico}$ , la sensibilidad dependerá de la resolución del sistema de adquisición.

Aunque el objetivo inicial del generador de perturbaciones era producir hundimientos e interrupciones de tensión, como se explicó anteriormente se han realizado pequeñas modificaciones sobre todo en el diseño del transformador para permitir también la generación de Aumentos de tensión con un valor de hasta 200% del voltaje nominal. Por lo tanto el rango de medición para las salidas de voltaje en la carga o equipo en prueba, sería  $>340V_{pico}$ , como criterio de diseño se toma  $0-400V_{pico}$ , la sensibilidad dependerá de la resolución del sistema de adquisición.

Para su diseño e implementación en un principio se propuso utilizar un sensor de voltaje de efecto hall por sus importantes ventajas, pero en su momento el costo era muy elevado. Por lo cual se utilizó un divisor resistivo de Alto Voltaje de Precisión, con un costo asequible. El divisor resistivo de referencia 1776-C81 [67] de CADDOCK Electronics Inc. tiene una precisión muy alta ( $\pm 0,1\%$ ) entre los divisores de tensión en el rango de 2000Vdc. Su resistencia total es de 10M $\Omega$ , como se muestra en la Figura 4-5.

**Figura 4-5:** Divisor resistivo de precisión de alto voltaje. [67]



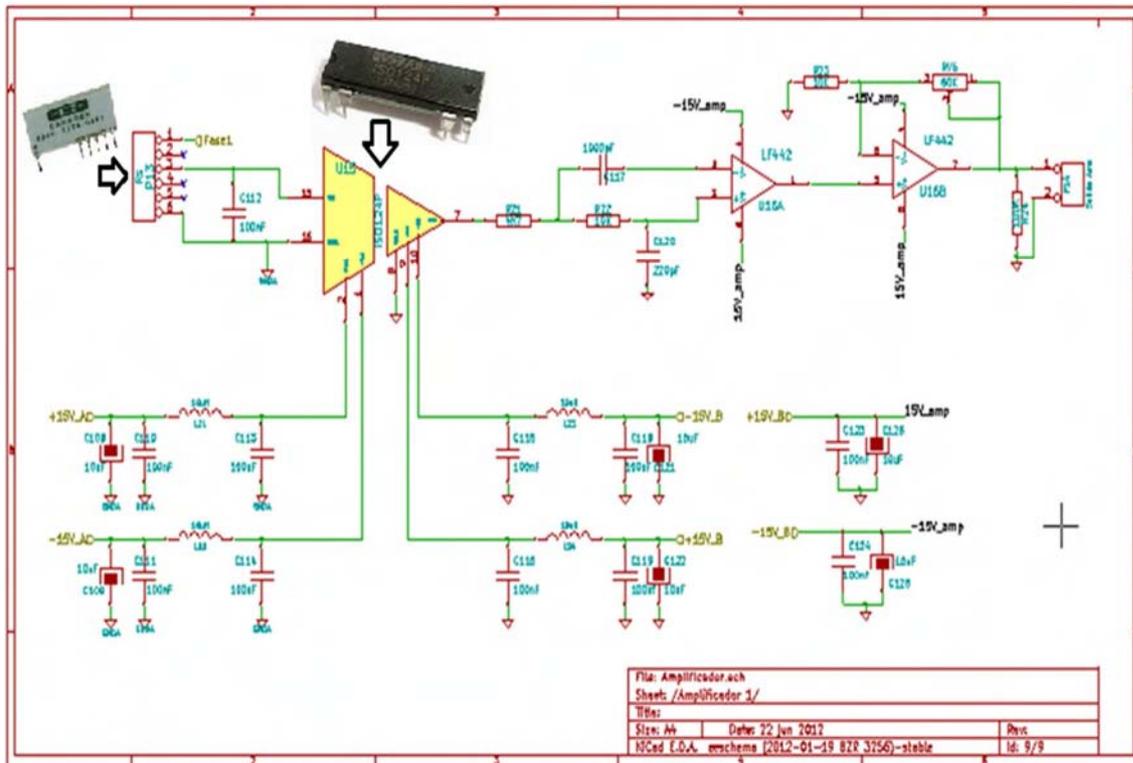
Estos divisores resistivos son formados por la unión en serie de resistencias de ultraprecisión del tipo USF, con tolerancias tan pequeñas como el 0,1% y variaciones en función de la temperatura muy pequeñas, del orden de 2 ppm/°C. Estas especificaciones son muy difíciles y/o casi imposibles de obtener en una construcción discreta.

Adicionalmente, el efecto capacitivo e inductivo en este tipo de divisor resistivo es muy bajo, lo que los hace ideales para metrología y adquisición de voltaje. El inconveniente de esta solución es que no se tiene aislamiento, para cual se requiere el uso de amplificadores de aislamiento en el acondicionamiento de señal.

El diseño del circuito de medición y acondicionamiento de señal de voltaje se presenta en la Figura 4-6. Donde el voltaje AC a medir es conectado al divisor resistivo en sus extremos (terminales 1 y 6), y el voltaje de salida se toma del terminal 3 con una atenuación de 1/100. Debido a que el sensor primario es una resistencia es necesario que el acondicionamiento no produzca efecto de carga, para ello se usa un amplificador de instrumentación ISO-124 [68] de Texas Instruments Incorporated. Este es un amplificador de instrumentación de alta precisión y de alto voltaje de aislamiento. Provee un aislamiento de 1,5KV entre las señales de voltaje de entrada (voltaje nominal red eléctrica y Voltaje en la carga-EUT) y las salidas conectadas a la tarjeta de adquisición.

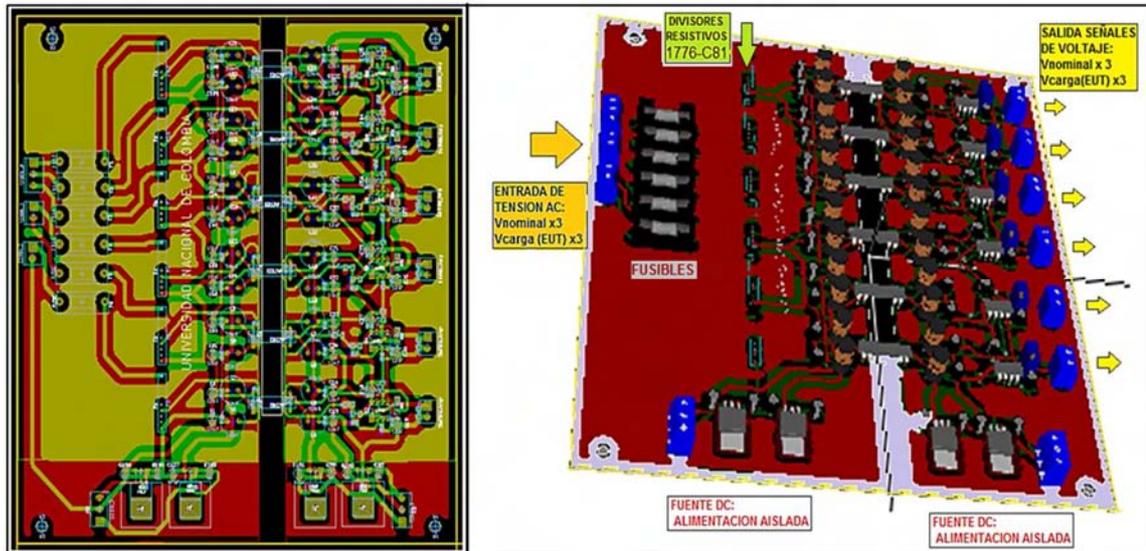
Nótese que el amplificador de instrumentación ISO-124 tiene ganancia unitaria, lo cual hace necesario que a su salida se diseñe un circuito amplificador. El circuito amplificador conectado a la salida del ISO-124 es un amplificador no-inversor de ganancia variable, porque para las entradas de voltaje nominal el rango necesario de  $0-200V_{pico}$ , este producirá a la salida del divisor de tensión un voltaje de 2V a plena escala, para aprovechar el rango de entrada de la tarjeta de acondicionamiento (0-10V) se necesita amplificar por 5 veces. Y porque para las entradas de voltaje en la carga o equipo en prueba (EUT) el rango necesario es de  $0-400V_{pico}$ , se producirá a la salida del divisor de tensión un voltaje de 4V a plena escala, para aprovechar el rango de entrada de la tarjeta de acondicionamiento (0-10V) se necesita amplificar por 2,5 veces. Teniendo en cuenta esto, se dejó la ganancia del amplificador no-inversor variable, esta se puede ajustar/calibrar para cada caso con un trimmer, tal como se muestra en la Figura 4-6.

Figura 4-6: Diseño del circuito de medición de voltaje. (KiCad)

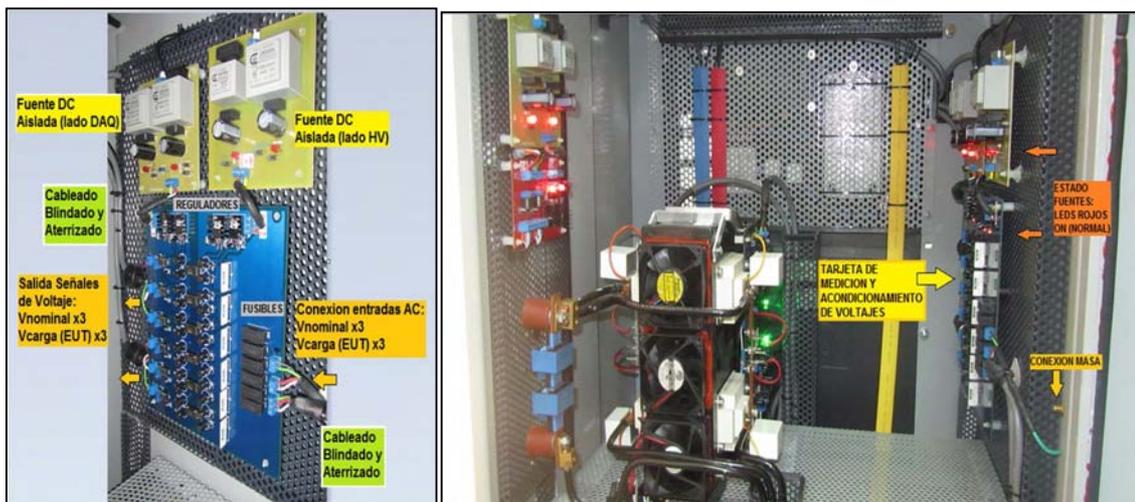


El amplificador no-inversor usa un amplificador operacional LF442 [69] de Texas Instruments Incorporated, este se escoge porque es un amplificador operacional Dual de bajos:  $V_{offset}$  ( $<1\text{mV}$ ) y  $I_{bias}$  ( $<50\text{pA}$ ). Se adiciona un amplificador entre el amplificador ISO y el amplificador de ganancia. Este es un filtro sellen-key, pasa bajos cuadrático con frecuencia de corte  $f_c=60\text{KHz}$  y ganancia unitaria, para eliminar el ruido de alta frecuencia que pueda contaminar la señal y para que la medición de corrientes y voltajes tengan el mismo ancho de banda.

En la Figura 4-7 se presenta el diseño de la tarjeta de circuito impreso PCB de medición y acondicionamiento de señales de tensión AC. Se tiene que medir y acondicionar tres voltajes AC correspondientes a los voltajes nominales de la red eléctrica, con un rango de medida de  $0-200V_{pico}$  (de entrada), y un rango de salida de  $0-10V_{pico}$ , y tres voltajes AC correspondientes a la carga o equipo en prueba (EUT), con un rango de medida de  $0-400V_{pico}$  (de entrada) y un rango de salida de  $0-10V_{pico}$ .

**Figura 4-7:** Diseño de la tarjeta PCB de medición de voltaje. (KiCad)

Nótese la disposición de los divisores resistivos (conectados a través de fusibles de protección), los amplificadores de instrumentación aislados ISO, y de los planos de tierra (En rojo) para garantizar el aislamiento de 1,5KV. Puede observarse que se necesitan dos fuentes aisladas, una para alimentar la etapa de entrada del amplificador ISO y otra para alimentar los circuitos de salida. También puede observarse en la Figura 4-7 y Figura 4-8 la implementación de los filtros PI para eliminar ruido, recomendados en la nota de aplicación del amplificador de instrumentación ISO-124 [68].

**Figura 4-8:** Montaje del sistema de medición de corriente en el armario del generador.

El montaje y conexión del sistema de medición y acondicionamiento de voltajes, en el armario del generador trifásico de perturbaciones de tensión se presenta en la Figura 4-8. En donde se puede ver como se asegura al equipo las dos tarjetas de fuente de alimentación DC aislada no regulada, y la tarjeta PCB de medición de voltaje. Nótese que el cableado es blindado y esta aterrizado a la masa del armario, esto para evitar que las señales de voltaje se contaminen con ruido. Las tarjetas de fuente de alimentación DC y la tarjeta de acondicionamiento de señal tienen indicadores led para que un usuario pueda verificar su estado normal.

## **4.2 Sistema de Control para el generador trifásico de perturbaciones de tensión**

El generador trifásico de perturbaciones de tensión requiere de un sistema de control que cumpla con las siguientes tareas o funciones:

- Interfaz de usuario: programación parámetros de la prueba.
- Verificación de estados de fallo/alarma/parada de emergencia.
- Ejecución de la prueba: sincronismo y control de los interruptores.
- Adquisición de las señales de voltaje y corriente de una prueba.
- Presentación de las señales de voltaje y corriente de una prueba.
- Registró de las señales de voltaje y corriente de una prueba.

### **4.2.1 Arquitectura del sistema de Control**

Haciendo un análisis de todas las funciones que requiere el sistema de control resulta muy difícil de implementarlas en una sola plataforma, ya sea un sistema microcontrolado, un sistema embebido, o un computador. Esto es porque las características de las funciones a implementar son bastante diferentes, que requieren capacidades de procesamiento diferentes y operan en tiempos de maquina muy diferentes.

Por esta razón una arquitectura distribuida es la más adecuada para a implementación, tal como se presentada en la Figura 4-9 y en la Figura 4-10, donde las funciones han sido optimizadas de acuerdo a las características de cada elemento de procesamiento.

El computador es una plataforma muy útil para la gestión, porque permite soportar la interfaz gráfica y la interfaz hombre maquina GUI-HMI en un lenguaje de alto nivel. También, permite una fácil comunicación con: sistemas de adquisición (DAQ), sistemas microcontrolados, sistemas de almacenamiento de datos, otros computadores, etc... usando sus puertos internos ISA/PCI/SATA, y sus puertos externos Paralelo/Serie/USB/HDMI/VGA/ETHERNET-RJ45.

Existen computadoras personales e industriales, la diferencia radica en la robustez, las computadoras industriales tiene mejoras como: mayor porcentaje de regulación de la fuente de alimentación, mejor ventilación y cajas y conectores más robustos. Para el equipo generador de perturbaciones es ideal un computador industrial, pero por razones presupuestales se usa un computador personal energizado con un regulador de tensión.

La interfaz gráfica y hombre-máquina sirve para permitir al usuario la programación de la prueba a realizar. Permite visualizar las señales y los datos de la prueba, y ver los estados del generador. Para su realización es posible utilizar diferentes programas de alto nivel como C++, JAVA, LabVIEW, etc... Para el control e interfaz GUI-HMI del generador de perturbaciones se ha decidido utilizar LabVIEW (<http://www.ni.com/labview/esa/>) de National Instruments Corporation, porque es una plataforma de programación basada en el desarrollo en un lenguaje gráfico, y especializada para control e instrumentación, y su interacción con hardware. También se decide utilizar este software porque la Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Ingeniería, tiene este software licenciado en su versión 8.2, esta versión es antigua pero suficiente para la aplicación (Versión al momento de realizar este desarrollo).

Para la adquisición de las señales de voltaje y corriente es posible utilizar un microcontrolador o una tarjeta tipo DAQ conectada a un PC. Se tiene que las señales a adquirir son periódicas, con un periodo de 16,6ms ( $f=60\text{Hz}$ ), y estableciendo como criterio una cantidad mínima de 200 muestras por periodo (100 muestras por semiciclo para una reconstrucción aceptable de la forma de onda) se necesitaría como mínimo

$12K_{muestras/seg}$ , si se tienen 12 señales (6 Voltaje, 6 Corriente) se requiere un sistema de adquisición con un mínimo de  $144K_{muestras/seg}$ . En un microcontrolador esta tarea es difícil de realizar para tantos canales de conversión análoga-digital porque la frecuencia de muestreo dependería del tiempo de máquina que utiliza todo el programa.

Por la anterior razón es mejor utilizar una tarjeta DAQ (data acquisition) puesto que se puede garantizar una alta frecuencia de muestreo para cada canal y a sus vez se tiene buffers de registro que permiten que la información no se pierda, por otra parte con una DAQ comercial se puede garantizar la exactitud y calibración de la medida.

Para el control de los 6 interruptores bidireccionales IGBT, se necesita un sistema de control que se sincronice a la red eléctrica y envíe las señales de activación. Un problema con el uso de computador, DAQ y Labview es que no es posible realizar esta función, porque no pueden trabajar en tiempo real. Esto es porque utilizan registros (buffers) para el almacenamiento de las señales adquiridas, y luego de completar un paquete se envían estos datos por el puerto, lo cual no permitiría una adecuada sincronización ciclo a ciclo.

**Figura 4-9:** Arquitectura del Sistema de control del generador de perturbaciones.



Por esta razón es necesario utilizar un sistema de control de los interruptores basado en una tarjeta microcontrolada. El microcontrolador permitirá la sincronización en tiempo real y el control de los interruptores, esto es porque es una tarea simple, con un tiempo de máquina del programa completo bastante pequeño. También es necesario diseñar un circuito de sincronismo con la red eléctrica, con un adecuado aislamiento.

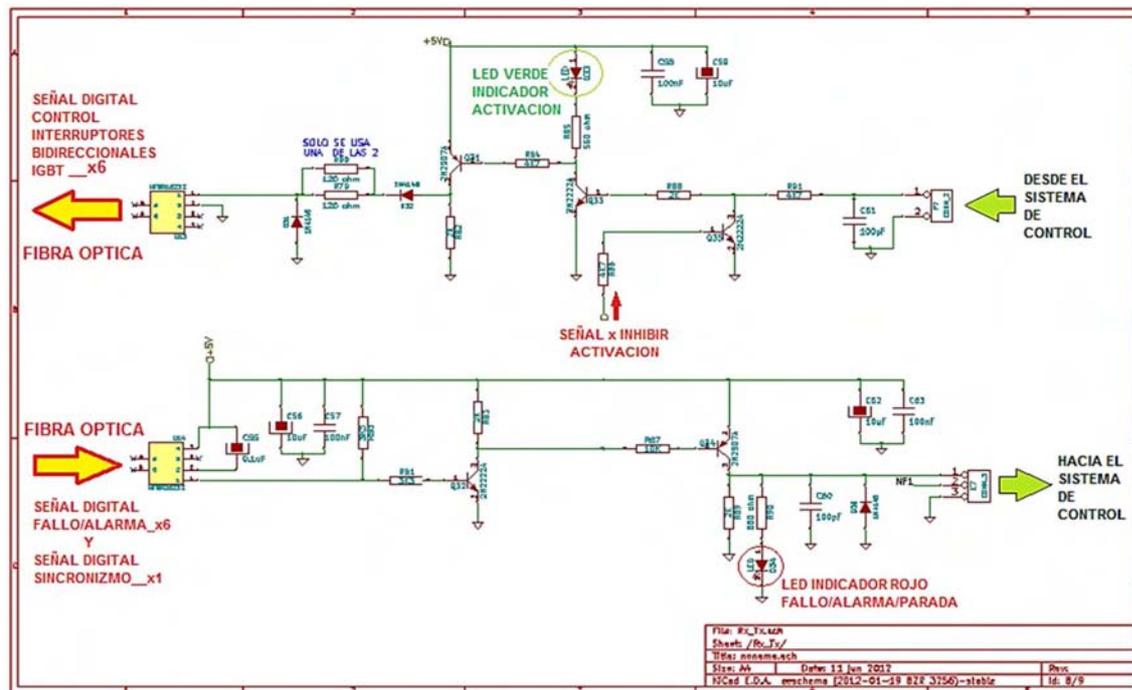
Para que el sistema de control pueda interactuar adecuadamente con todas las demás partes del generador es necesario preservar las características de aislamiento y compatibilidad electromagnética.

Los módulos de medición de voltajes y corrientes ya tiene aislamiento y sus salidas pueden conectarse directamente a la DAQ. Pero los interruptores bidireccionales IGBT, tiene comunicación por fibra óptica, lo que hace necesario el diseño de una tarjeta que acondicione estas señales ópticas digitales desde y hacia el sistema de control.

#### **4.2.2 Tarjeta de acondicionamiento de señales digitales**

El generador trifásico de perturbaciones de tensión en su sistema de control utiliza señales digitales para controlar la activación-apagado de los 6 interruptores bidireccionales IGBT. También utiliza señales digitales para determinar los estados normal/fallo, entendiéndose como estado normal la falta de señal de fallo/alarma, esta señal proviene de los 6 drivers de interruptores IGBT para indicar que existe un fallo/alarma por desaturación del transistor, sobrecorriente, o sobre temperatura, en resumen un fallo en los interruptores que por seguridad debe impedir su activación.

Como se mencionó anteriormente estas señales deben aislarse entre el sistema de control y los drivers de control de los interruptores de bidireccionales IGBT, este aislamiento se realiza mediante la conexión de las señales por fibra óptica. Por lo tanto se requiere el desarrollo de una tarjeta que acondicione las señales eléctricas digitales en señales ópticas y viceversa, en la Figura 4-10 se presenta el diseño basado en transistores.

**Figura 4-10:** Diseño tarjeta acondicionamiento de señales digitales.

El circuito de transistores presentado en la Figura 4-10 es usado para acondicionar la señal digital de control de activación-apagado del interruptor IGBT, entre el sistema microcontrolado y el transmisor óptico HFBR1523Z [63].

Nótese que en el diseño se incluye un transistor para inhibir la activación cuando exista señal de fallo/alarma/parada de emergencia, todas las señales de fallo/alarma y la señal de parada de emergencia se suman con un arreglo de diodos acoplados por cátodo, produciendo así una única seña que inhibe la activación de todos los interruptores IGBT.

En la tarjeta de acondicionamiento de señales digitales se indican visualmente los estados de las señales activación de los seis interruptores IGBT usando leds indicadores de color Verde, uno por cada señal de activación que se envía ópticamente a los drivers de control de los interruptores IGBT.

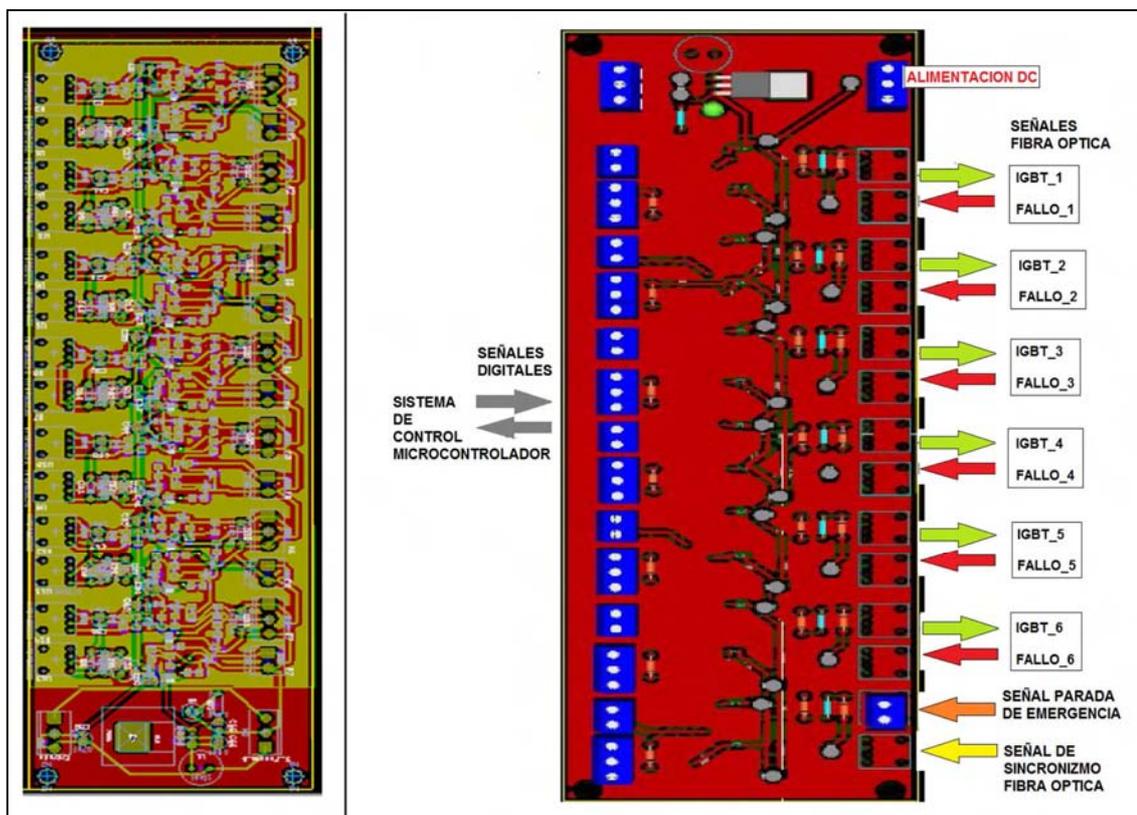
En la Figura 4-10 también se presenta el circuito de transistores usado para acondicionar la señal digital de fallo/alarma, proveniente de forma óptica desde los drivers de control de los interruptores IGBT y que se envía al sistema de control microcontrolado.

En la tarjeta de acondicionamiento de señales digitales se indican visualmente los estados de fallo/alarma usando leds indicadores de color Rojos, uno por cada señal de fallo proveniente de los drivers de control de los interruptores IGBT.

A esta señal se adiciona en otro canal una entrada de "ENABLE" proveniente del sistema de control, que solo permitirá la activación de los interruptores cuando todos los estados hayan sido comprobados.

La señal de parada de emergencia (Seta Roja) se conecta a la tarjeta de acondicionamiento de señales digitales por medio cableado, para lo cual se reemplaza la entrada óptica de una señal de fallo de un canal que no se usa. Esto se logra retirando el receptor óptico HFBR 2523Z [63] y colocando en su lugar una bornera. La señal de parada de emergencia es una señal de lógica negada de 0-5Vdc.

Figura 4-11: Diseño tarjeta acondicionamiento de señales digitales.

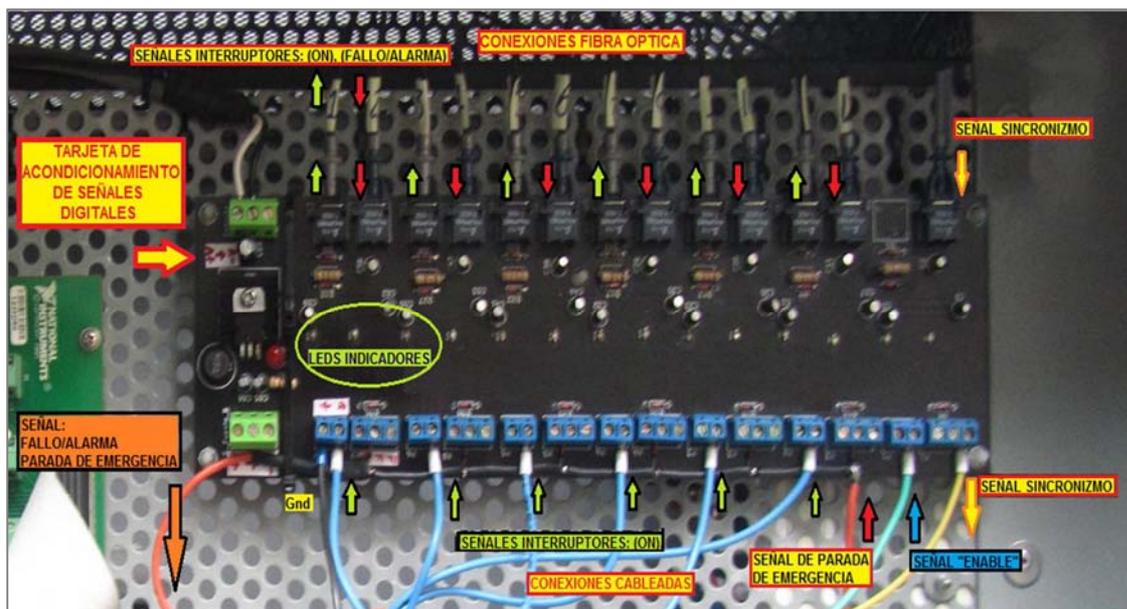


La señal de sincronismo es una señal óptica digital cuyo flanco de subida se produce en el cruce por cero de la onda seno de la red eléctrica. Esta señal se acopla por fibra óptica y se conecta a un receptor óptico HFBR 2523Z [63] cuya salida se envía al sistema de control microcontrolado.

En la Figura 4-11 se presenta el diseño del circuito impreso de la tarjeta de acondicionamiento de señales digitales, en donde se muestran sus conexiones. Nótese que la tarjeta requiere una fuente de alimentación aislada y tiene incluido en la tarjeta un regulador de 5Vdc.

En la Figura 4-12 se presenta el montaje de la tarjeta de acondicionamiento de señales digitales en el armario del equipo generador de perturbaciones de tensión.

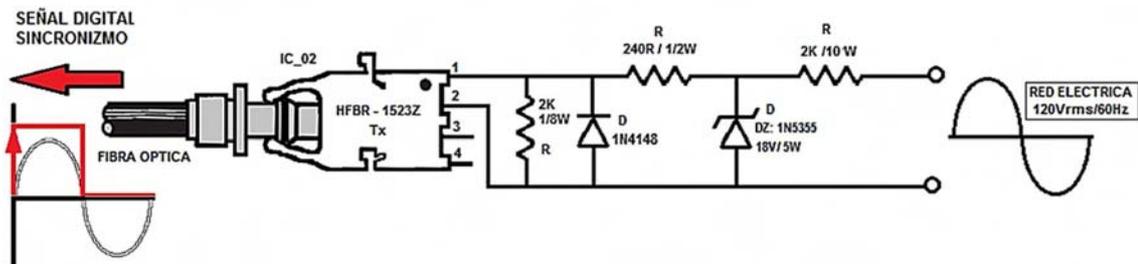
**Figura 4-12:** Montaje e instalación, tarjeta acondicionamiento de señales digitales.



### 4.2.3 Circuito de sincronismo con la red eléctrica

El diseño del circuito de sincronismo es el presentado en la Figura 4-13, en donde el voltaje de la red eléctrica de 120Vrms/60Hz es recortado por el diodo zener y es convertido a una señal cuadrada sincronizada con la onda senoidal. Esta onda cuadrada tiene el flanco de subida sincronizado con el cruce por cero de la onda seno, y es enviada por la fibra óptica usando el transmisor óptico HFBR 2523Z [63].

**Figura 4-13:** Diseño Circuito de sincronismo con la red eléctrica.



En la Figura 4-14 se presenta el montaje del circuito de sincronismo con la red eléctrica, nótese la conexión de potencia a la primera de las fases y la salida de fibra óptica con la señal óptica digital de sincronización.

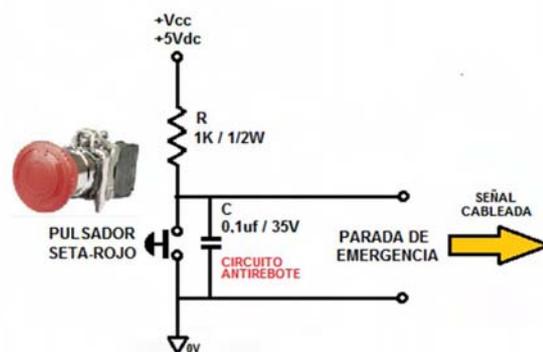
**Figura 4-14:** Montaje del Circuito de sincronismo con la red eléctrica.



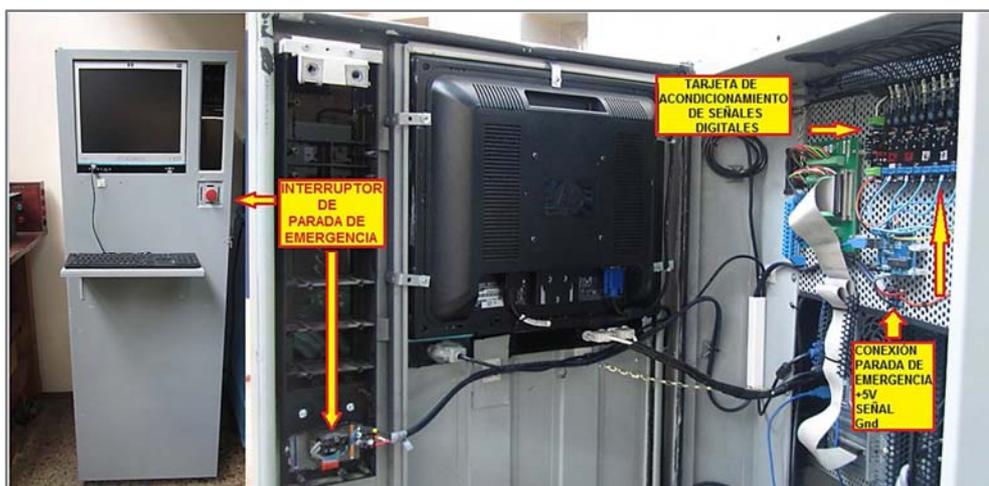
### 4.2.4 Circuito de parada de emergencia

El circuito de parada de emergencia mostrado en la Figura 4-15, está basado en un interruptor twist tipo seta de color rojo, referencia XB2-BS542, con nivel de protección IP66, soporta 10A / 600V, de Schneider electric, Telemecanique. Este interruptor sirve para que en caso de emergencia un usuario pueda detener la prueba e inhibir la activación de los interruptores bidireccionales IGBT. El circuito utiliza una fuente DC de 5Volitos y un condensador anti-rebote para evitar ruido. La Señal de salida será un voltaje de 5V para indicar u estado normal, y 0V para indicar estado de parada de emergencia. Esta señal de conecta por cableado blindado y aterrizado a la tarjeta de acondicionamiento de señales digitales. Su montaje se presenta en la Figura 4-16.

**Figura 4-15:** Diseño Circuito de parada de emergencia.



**Figura 4-16:** Montaje Circuito de parada de emergencia.



### 4.2.5 Tarjeta de adquisición de señales: DAQ

Como se mencionó anteriormente el sistema de control del generador trifásico de perturbaciones de tensión requiere un sistema de adquisición de señales análogas. Los dispositivos y tarjetas DAQ son instrumentos de propósito general diseñados para medir señales de voltaje, estos pueden adquirir con precisión las señales puesto que incluyen circuitos de acondicionamiento de señal que incluyen funciones como: amplificación, filtrado, aislamiento eléctrico, multiplexación, registro y almacenamiento de datos, y comunicaciones para transportar la las señales al sistema de control.

El generador de perturbaciones de tensión requiere la adquisición de seis señales analógicas de voltaje que representan: tres Voltajes nominales (uno por cada fase: A,B,C) y tres Voltajes en la carga o equipo en prueba (EUT) (uno por cada fase: A,B,C). También, requiere la adquisición de seis señales analógicas de voltaje que representan a las 6 Corrientes en la carga o equipo en prueba (EUT) (2 por fase: A,B,C).

Nótese que el sistema de control no adquiere o entrega señales digitales a través de la DAQ, esto es porque las señales digitales son manejadas por la tarjeta microcontrolada que ejecuta el control de los interruptores de potencia en cada prueba.

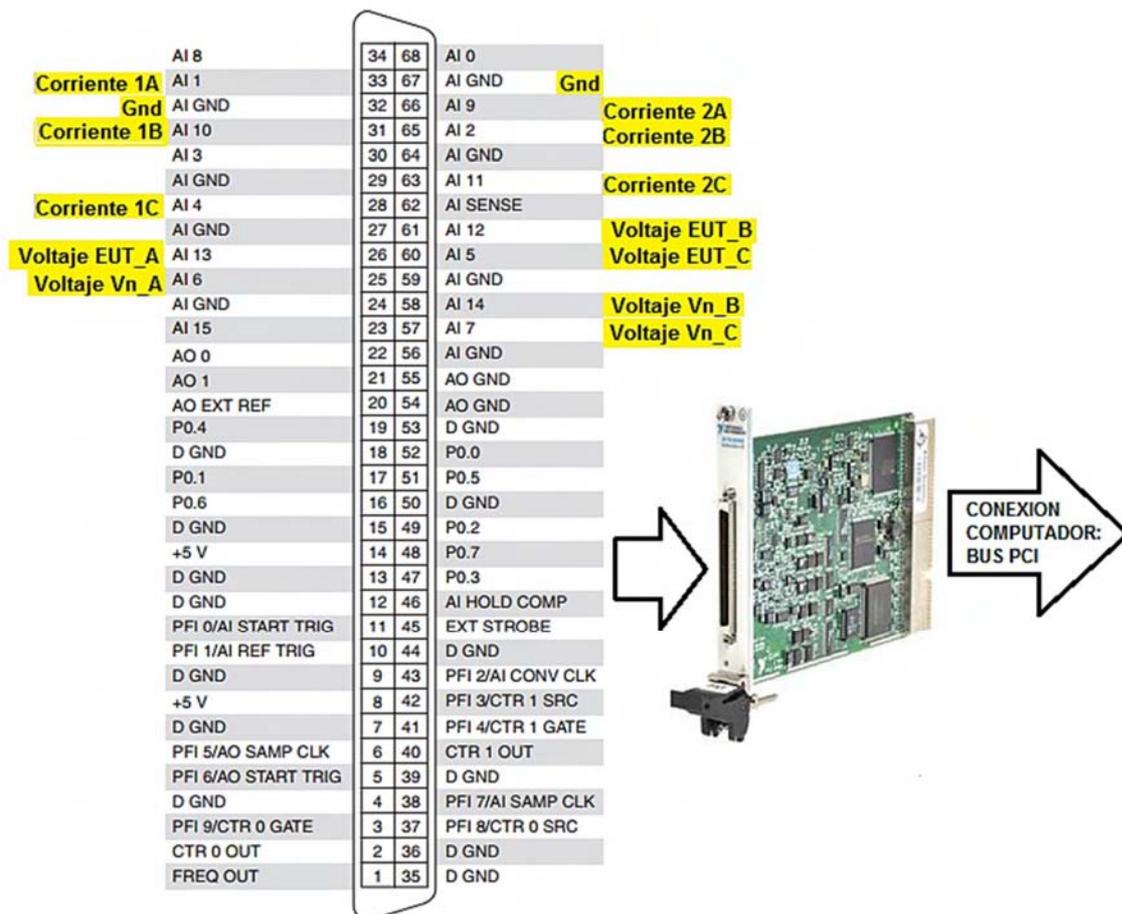
El sistema de adquisición de señales análogas esta soportado en la tarjeta PCI MIO 16E-4 (Equivalente a NI PCI-6040E) [70] de National Instruments ([www.ni.com](http://www.ni.com)). Que tiene las siguientes características para sus entradas analógicas:

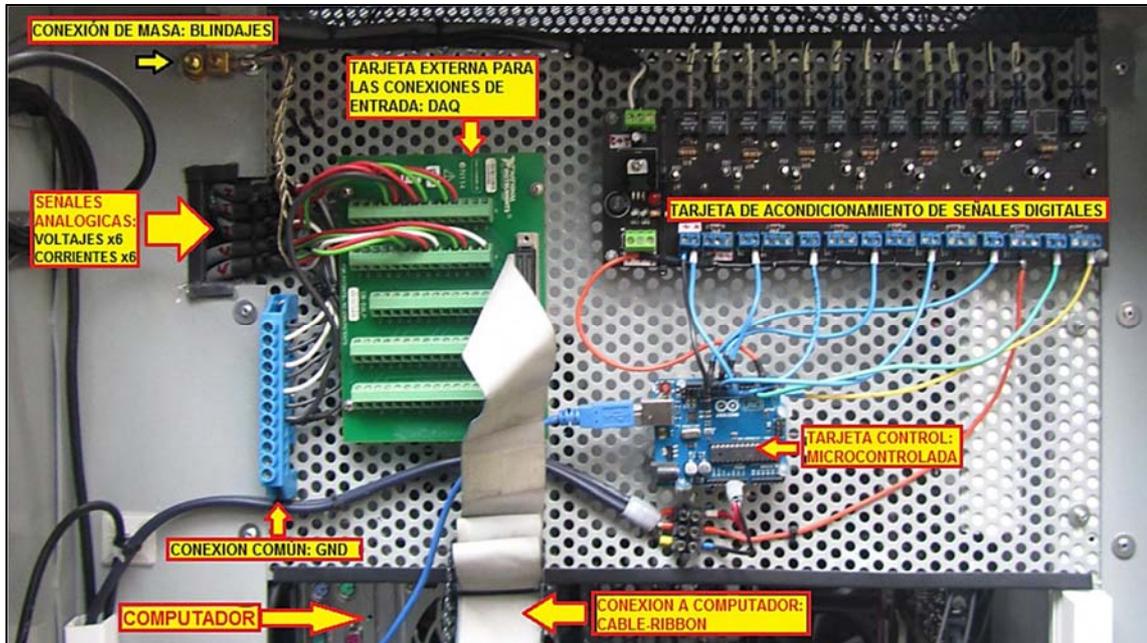
- 16 entradas analógicas en modo simple, o 8 entradas en modo diferencial.
- Rango de entrada:  $0 \pm 10$  Voltios (Bipolar).
- Resolución: 12 bits.
- Máxima tasa de muestreo total en modo multicanal: 250Kmuestras/seg.
- Máxima tasa de muestreo por canal =  $(250\text{Kmuestra/seg}) / n^{\circ}$  entadas.
- Comunicación por Bus PCI.
- Compatibilidad con LabVIEW.

Para el generador de perturbaciones se usa esta tarjeta por su cantidad de canales analógicos y su aceptable tasa de muestreo. Aunque la tasa de muestreo en la interfaz GUI-HMI es programable, se recomienda usar 18Kmuestras/seg.

En la Figura 4-17 se presenta la forma física de la DAQ usada, y la configuración de pines para conexión de los canales analógicos. Nótese que esta configuración es la del conector de salida, dado que se conecta por un cable ribbon a una tarjeta de conexiones externa que hace las veces de bornera tal como se muestra en la Figura 4-18. Por otra parte la tarjeta DAQ se inserta en el Bus PCI del computador, lo que quiere decir que se instala internamente en el computador.

**Figura 4-17:** Configuración pines PCI-MIO-16E-4 (NI PCI-6040E). [70]

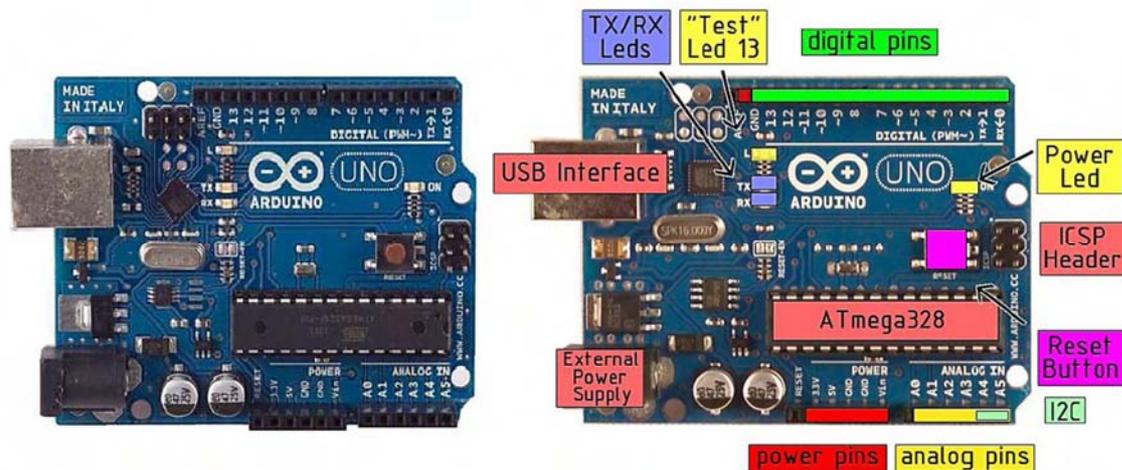


**Figura 4-18:** Montaje y conexión externa de la DAQ PCI-MIO-16E-4 (NI PCI-6040E).

#### 4.2.6 Sistema de control: Tarjeta microcontrolada ARDUINO

La tarjeta microcontrolador Arduino es una herramienta fácil de usar y de código abierto, lo que significa que el desarrollo de software es libre. El proyecto Arduino se inició en Italia para desarrollar hardware de bajo costo, una visión general se encuentra en la página de inicio de Arduino que es [www.arduino.cc/es](http://www.arduino.cc/es). En la Figura 4-19 se presenta la tarjeta microcontrolada Arduino UNO [71] [72].

El Arduino UNO está basado en el microcontrolador Atmega328 [73]. Se escogió para la implementación del sistema de control de interruptores IGBT porque cuenta con: 14 pines de entrada/salida digital (6 pueden ser utilizados como salidas PWM), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, y un botón de reinicio. Adicionalmente, La tarjeta tiene todos los periféricos necesarios para apoyar el microcontrolador, basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB, o alimentar con un adaptador o la batería [71] [72].

**Figura 4-19:** Tarjeta microcontrolada Arduino UNO [71] [72].

Las especificaciones técnicas de la tarjeta Arduino ONE, son:

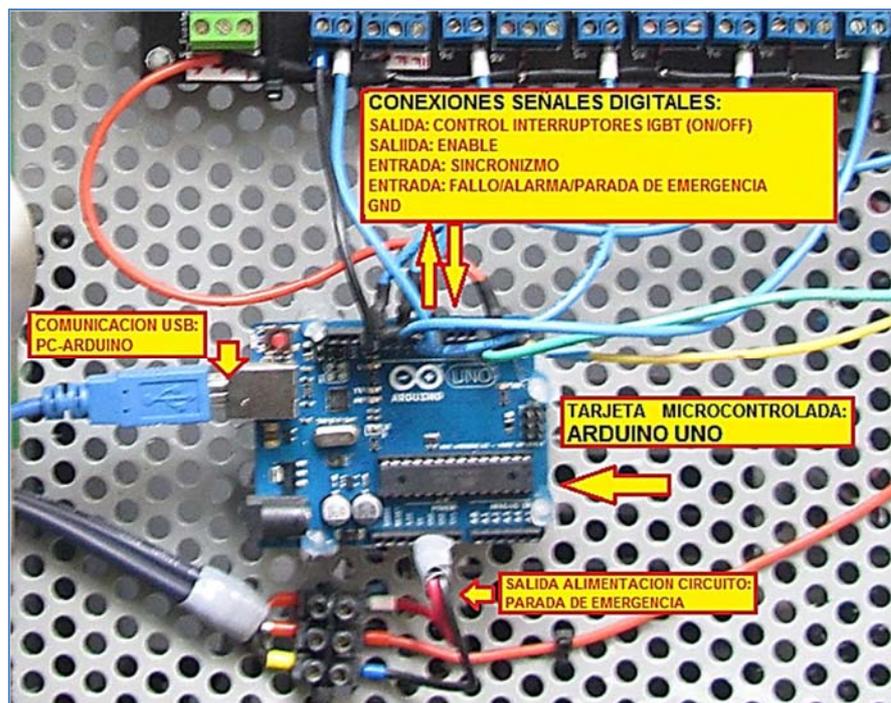
- Microcontrolador: ATmega328.
- Voltaje de alimentación: 5V
- Voltaje de entrada (recomendado): 7-12V
- Voltaje de entrada (limites): 6-20V
- Pines Digitales I/O : 14 ( de los cuales 6 pueden proveer salida PWM)
- Pines de entrada analógica: 6 (convertores ADC, Resolución 8 bits)
- Máxima Corrientes por pines I/O: 40 mA
- Máxima corriente para el pin de 3.3V: 50 mA
- Memoria: Flash Memory 32 KB (0.5 KB son usados para el bootloader)
- Memoria: SRAM 2 KB
- Memoria: EEPROM 1 KB
- Reloj: Clock Speed 16 MHz

En la Figura 4-20 se presenta el montaje y conexiones de la tarjeta microcontrolada Arduino ONE en el generador de perturbaciones de tensión. En donde se muestra la conexión de las señales digitales con la tarjeta de acondicionamiento de señales digitales. La tarjeta tiene 6 salidas correspondientes a las señales para el control de activación y apagado de los interruptores bidireccionales basados en módulos IGBT. Adicionalmente, tiene una salida de "Enable" con lógica negada que impide la activación

de los interruptores hasta que el control haya determinado que el estado del equipo es normal, esto evita una activación indeseada en caso de fallo. La tarjeta también tiene dos entradas digitales, la primera para recibir la señal de sincronismo de la red eléctrica (Se sincroniza con el flanco de subida), y la segunda para detectar los estados de fallo/alarma/parada de emergencia. De esta tarjeta se toma la alimentación del circuito de parada de emergencia.

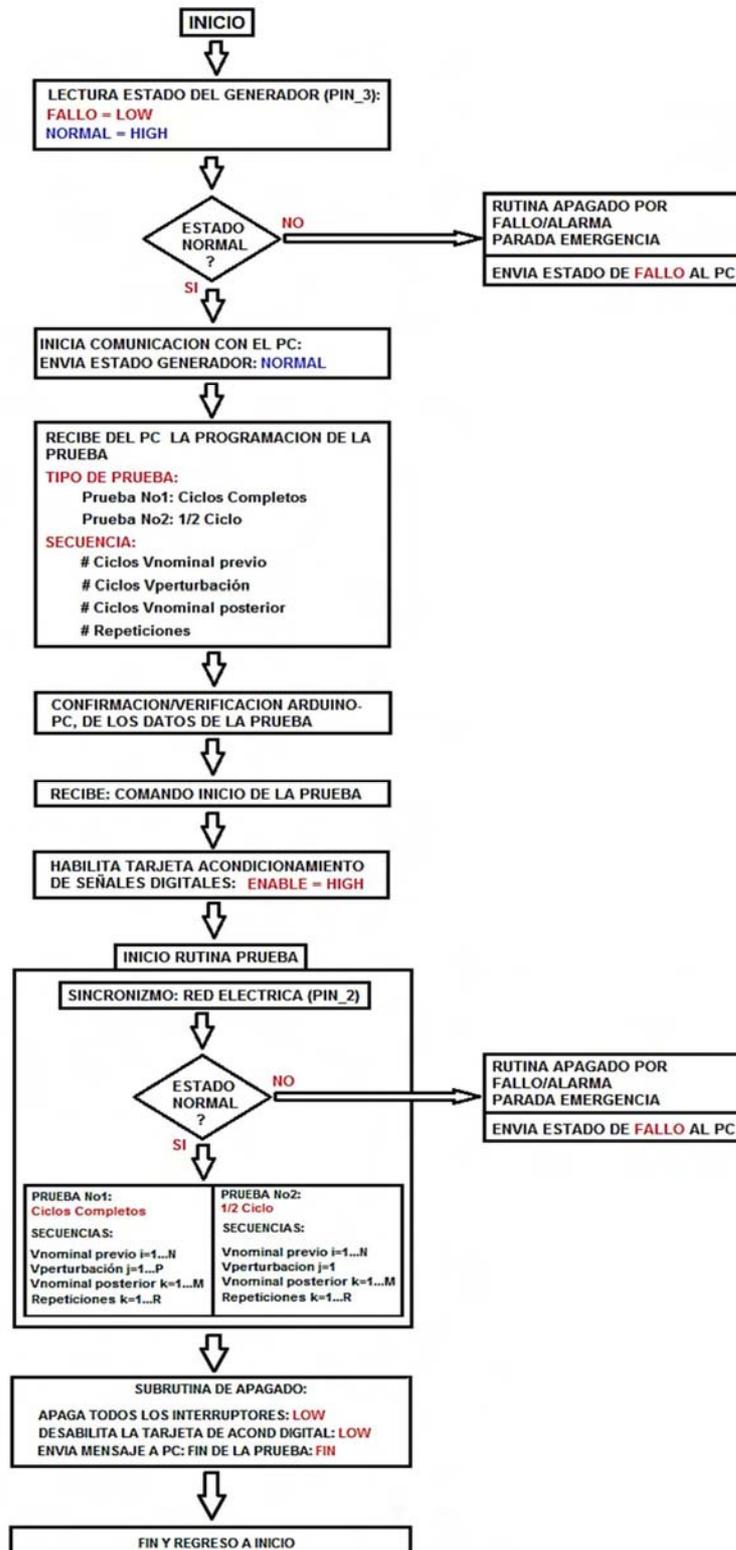
La tarjeta Arduino ONU tiene un puerto de comunicación USB que es utilizado para la comunicación con el PC. Básicamente para cargar la programación (receta) de la prueba de perturbación de tensión, y recibir la instrucción de inicio de prueba.

**Figura 4-20:** Montaje de la Tarjeta microcontrolada Arduino UNO, en el Generador.



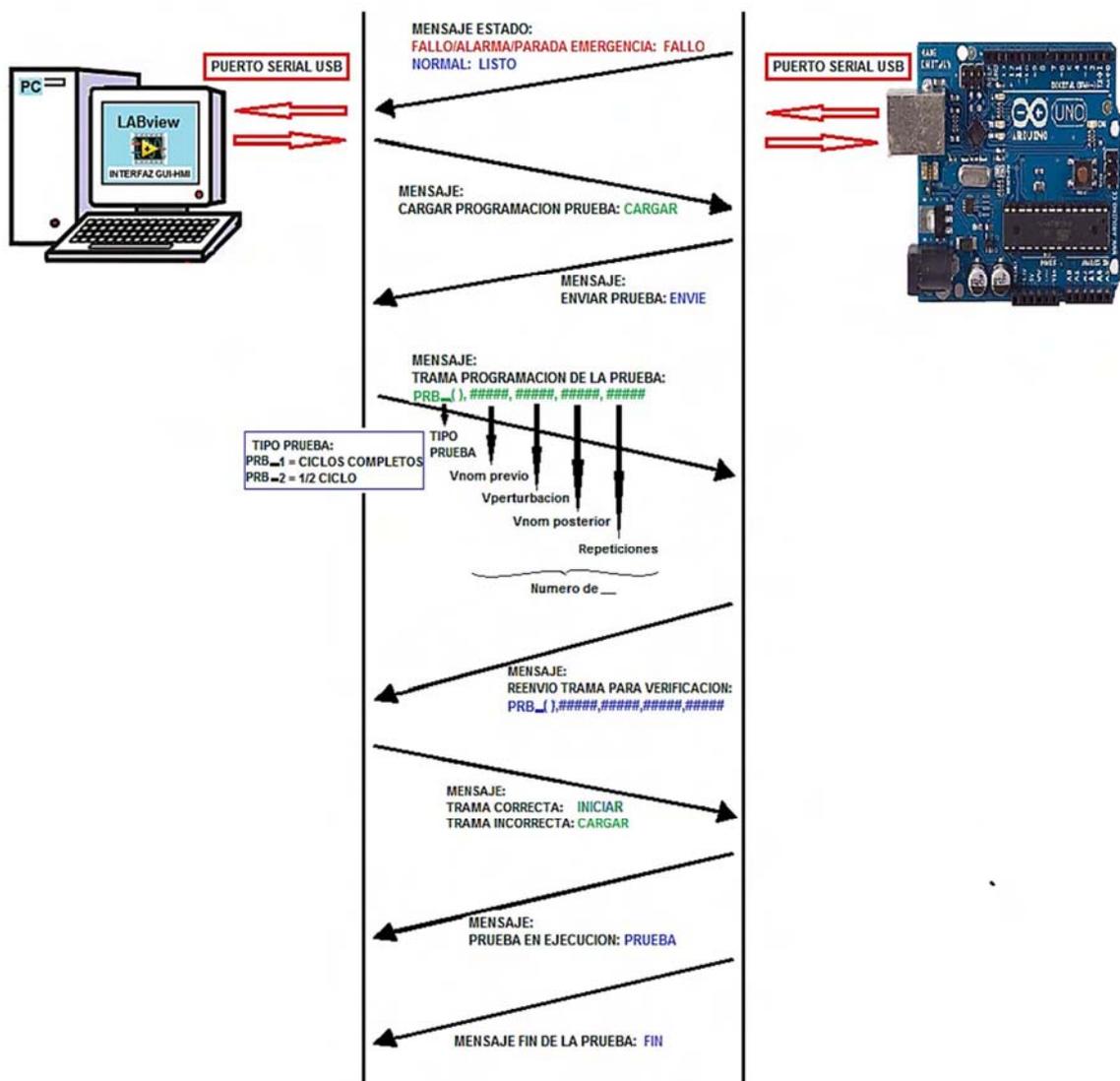
En la Figura 4-21 se presenta el diagrama de flujo del programa implementado en la tarjeta microcontrolada Arduino UNO, en donde se destaca la importancia de la detección de cualquier estado de fallo para la detección/inhibición de la prueba, con el fin de garantizar la integridad del generador de perturbaciones de tensión. Es importante aclarar que en la subrutina de prueba este estado se lee (detecta) en cada secuencia.

Figura 4-21: Diagrama de flujo del programa para el microcontrolador Arduino UNO.



Dado que en el PC se implementa la interfaz GUI-HMI, en este el usuario programa el tipo de prueba y el número de ciclos de cada secuencia. Para que la tarjeta microcontrolada Arduino ONE reciba esta información se debe establecer una comunicación bidireccional usando el puerto serial USB, tal como se presenta en la Figura 4-22. Como se mencionó anteriormente el control en el Arduino envía al PC el estado del equipo, si es normal envía "LISTO", si hay fallo/alarma/parada de emergencia envía "FALLO", luego espera que el PC envíe "CARGAR", esto indicara que existe una prueba programada y que el Arduino debe prepararse para recibir la programación.

Figura 4-22: Comunicación PC- Arduino UNO.



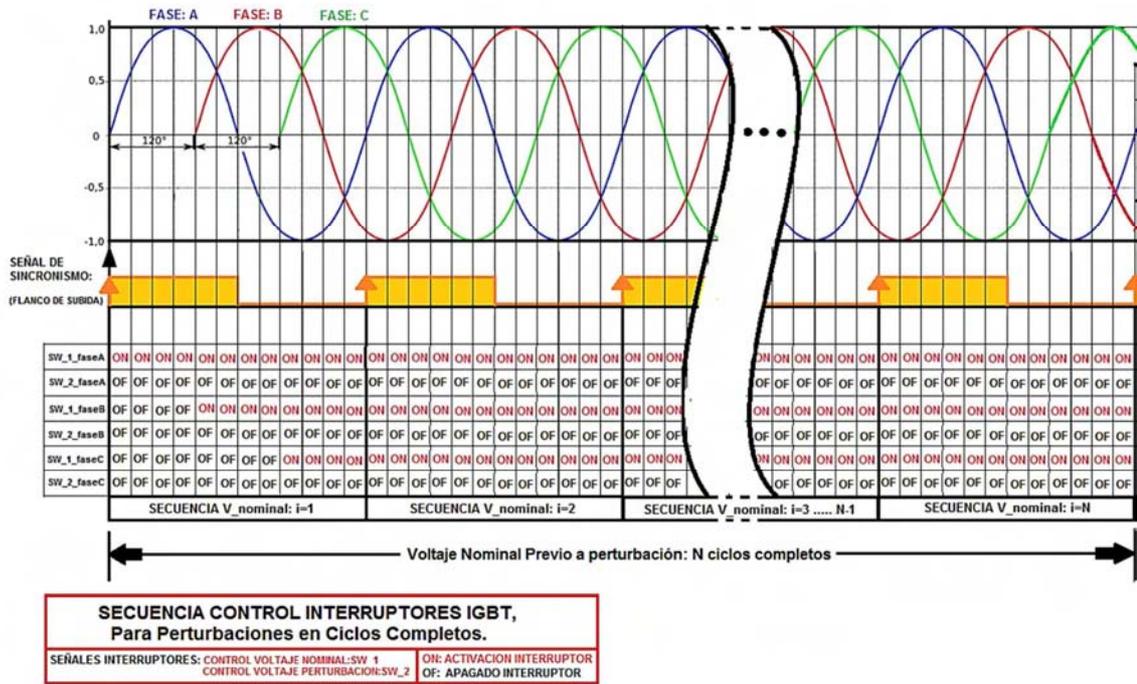
Una vez el control en el Arduino está preparado envía el mensaje “ENVIE” para recibir la programación de la prueba, por lo tanto el PC envía la trama con: el tipo de prueba, el número de ciclos del voltaje nominal previo ( $V_{nom}$  previo), el número de ciclos del voltaje de perturbación (Perturbación), el número de ciclos del voltaje nominal posterior ( $V_{nom}$  posterior), y el número de repeticiones de la prueba. El tipo de prueba indica al control si la prueba es de ciclos completos o de medio ciclo, esto es importante para cargar las secuencia de disparo de los interruptores IGBT adecuadas para cada ciclo.

Luego el control en el Arduino reenvía la trama para que el PC verifique que la información es correcta y envíe el mensaje de inicio de prueba “INICIAR”. El control en el Arduino se sincroniza a la red eléctrica e iniciara la prueba, cuando está en prueba envía un mensaje al PC indicando que la prueba está en ejecución, este mensaje es “PRUEBA”. Si en algún momento ocurre un fallo en el equipo el control en el Arduino detendrá la prueba y enviara el mensaje “FALLO”. Al terminar la prueba se envía al PC el mensaje “FIN”.

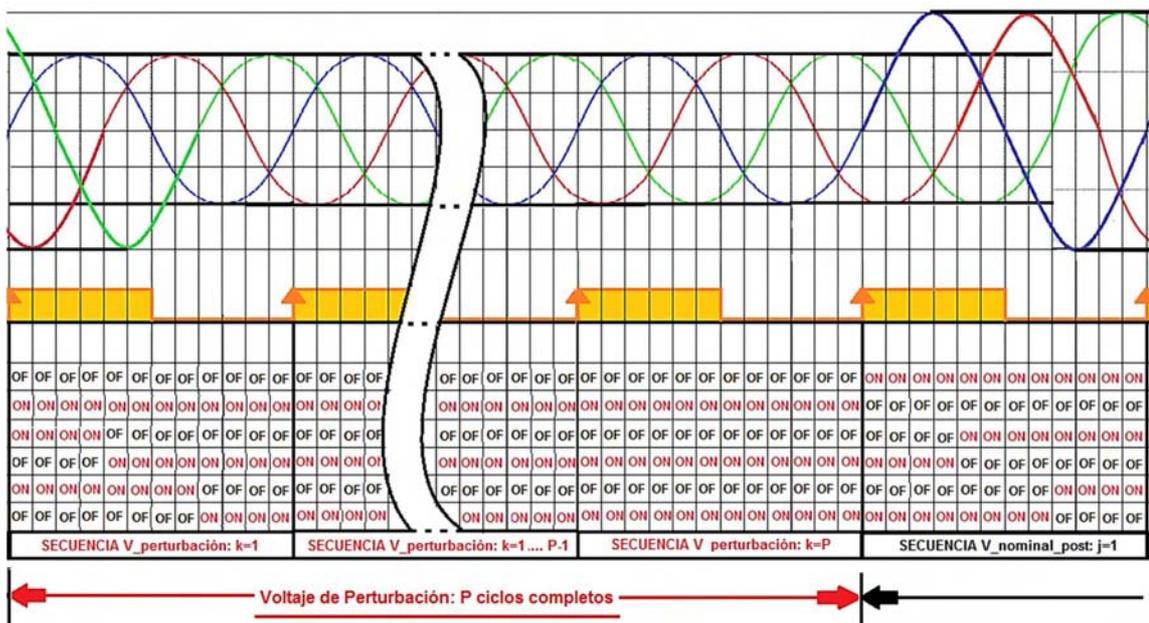
Al realizarse la prueba el control programado en el Arduino ONE, debe cargar las secuencias de disparo para el control de la activación y apagado de los interruptores bidireccionales IGBT, estas secuencias dependerán del tipo de prueba. Es importante recordar que el valor de la tensión de perturbación es proporcionada por la conexión de los taps del transformador Zig-Zag. La secuencia para cada ciclo se presenta de forma matricial en las Figuras [4-23, 4-24, 4-25, 4-26, 4-27], donde la activación de un interruptor está representada por “ON” y representa un pin de salida que se coloca en “HIGH” o “1”. Y el apagado de un interruptor está representado por “OF” y representa el estado del pin de salida que controla el interruptor, que se coloca en “LOW” o “0”. Para que el control funcione adecuadamente cada estado de la secuencia se calcula en fracciones de  $1/24$  del periodo, dado que el periodo es  $1/60$  segundos, estos intervalos son de  $694\mu$ segundos.

Nótese que los estados de activación/apagado permiten conectar el voltaje nominal o el voltaje de perturbación según se desee, y que por seguridad e integridad del equipo nunca se activan dos interruptores de una misma fase. En cambio al finalizar la prueba todos los interruptores se apagan. Adicionalmente, se puede observar que todos los cambios de voltaje se referencian a los cruces por cero de los voltajes.

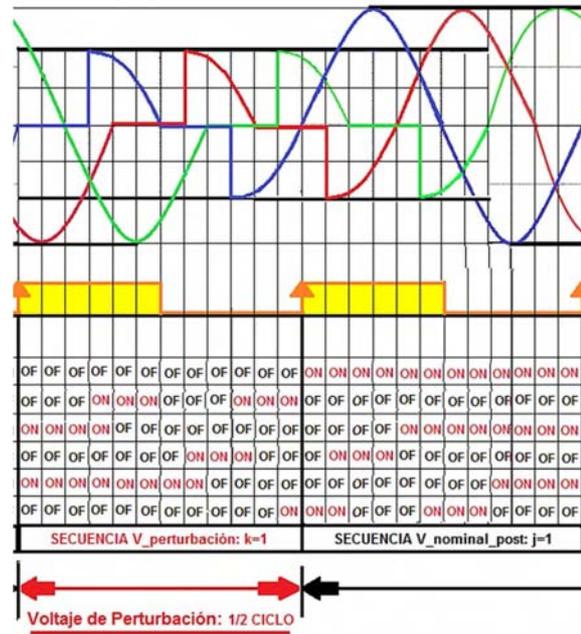
**Figura 4-23:** Control Arduino: Secuencia de control para los interruptores IGBT en el estado  $V_{nominal}$  previo.



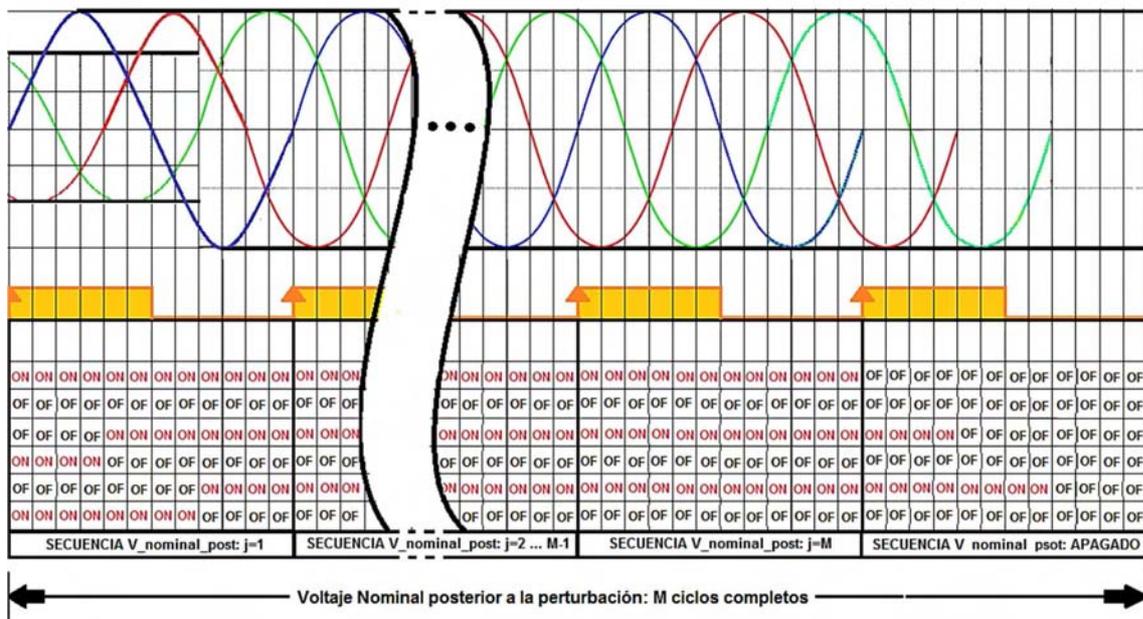
**Figura 4-24:** Control Arduino: Secuencia de control para los interruptores IGBT en el estado  $V_{perturbación}$ , prueba tipo 1: ciclos completos.



**Figura 4-25:** Control Arduino: Secuencia de control para los interruptores IGBT en el estado  $V_{perturbación}$ , prueba tipo 2:  $\frac{1}{2}$  ciclo.



**Figura 4-26:** Control Arduino: Secuencia de control para los interruptores IGBT en el estado  $V_{nominal}$  posterior, prueba tipo 1: ciclos completos.





### 4.2.7 Sistema de control, supervisión e interfaz GUI-HMI: PC

En la Figura 4-28 se presenta una imagen del diagrama de bloques del programa en LABview, nótese que el programa es de gran tamaño y está dividido por secciones funcionales que trabajan de forma secuencial:

**(1.) Menú de prueba:** Esta sección funcional es la encargada de la programación de los botones se stop, habilitación/deshabilitación de panel de receta de prueba, habilitación/deshabilitación de panel de Visualización/Registro de señales, selección de tipo de prueba (1/2 ciclo/ciclos completos), controles de ingreso de numero de ciclos de prueba (voltajes nominales y perturbación), Hora/Fecha, y parada de emergencia.

**(2.) Configuración puerto serial de comunicación VISA:** Esta sección del programa configura la comunicación serial: puerto serial USB, en el COM4, rata: 9600 baudios, datos: 8 bits con bit de paridad.

**(3.) Comunicación PC-Arduino ONE:** Este bloque se encarga del intercambio de mensajes (cadenas string) entre el computador y el control en el Arduino ONE.

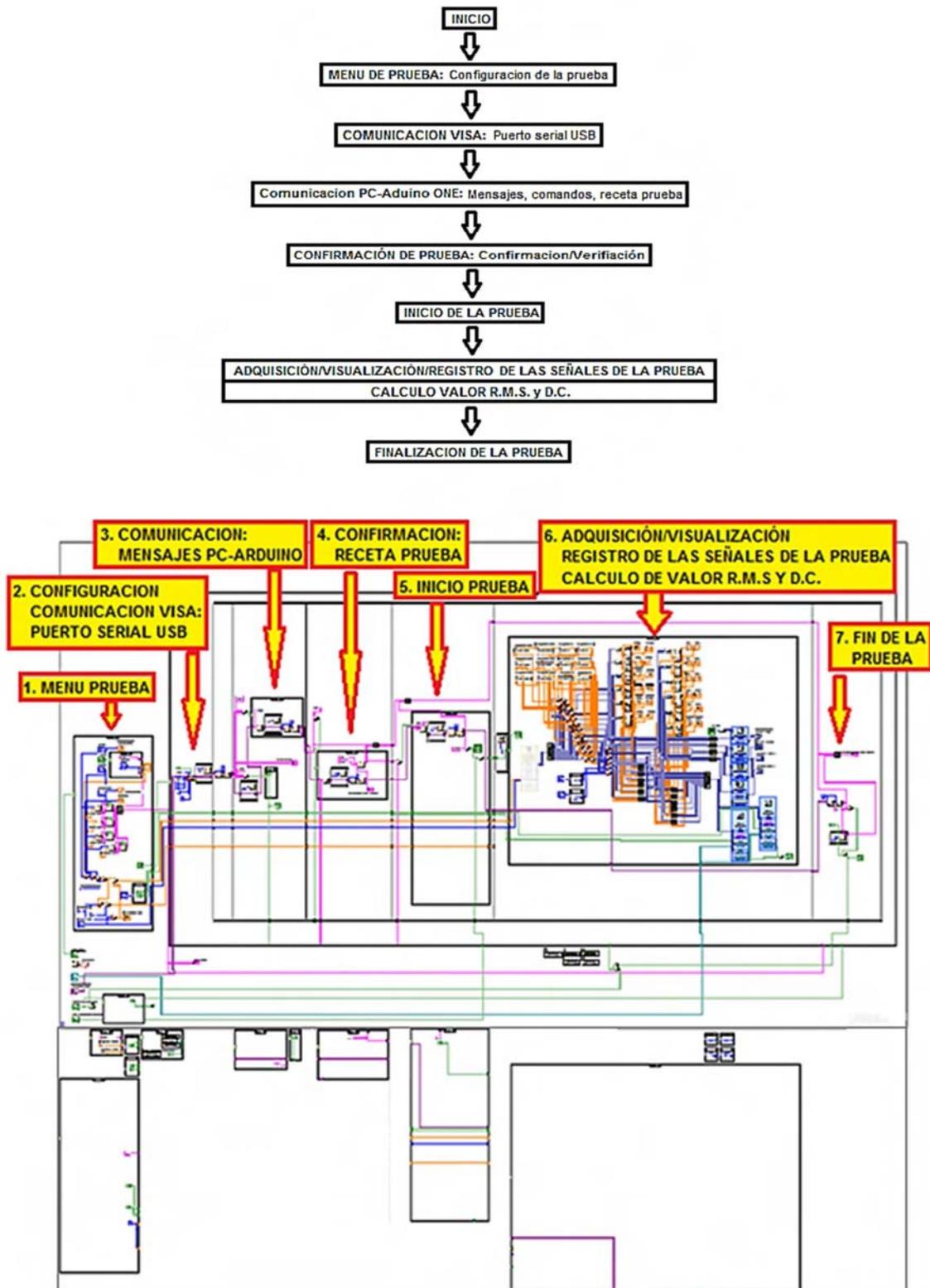
**(4.) Confirmación Receta de la Prueba:** Este bloque permite la confirmación/verificación de las especificaciones de la programación de la prueba a realizar, esto significa que la programación de la prueba en el control Arduino ONE es correcta.

**(5.) Inicio de la Prueba:** Este bloque envía al control Arduino el mensaje de inicio, espera que el control Arduino se sincronice a la red eléctrica.

**(6.) Adquisición/Visualización/Registro de la prueba:** Este bloque contiene la configuración de la DAQ, los bloques de visualización de las señales de voltaje y corriente adquiridas por la DAQ, el cálculo de los valores R.M.S. y D.C. También, el registro de las señales en formato TxT y TDMS.

**(7.) Finalización de la prueba:** Este bloque espera que la prueba concluya correctamente, cierra el puerto serial y detiene el programa.

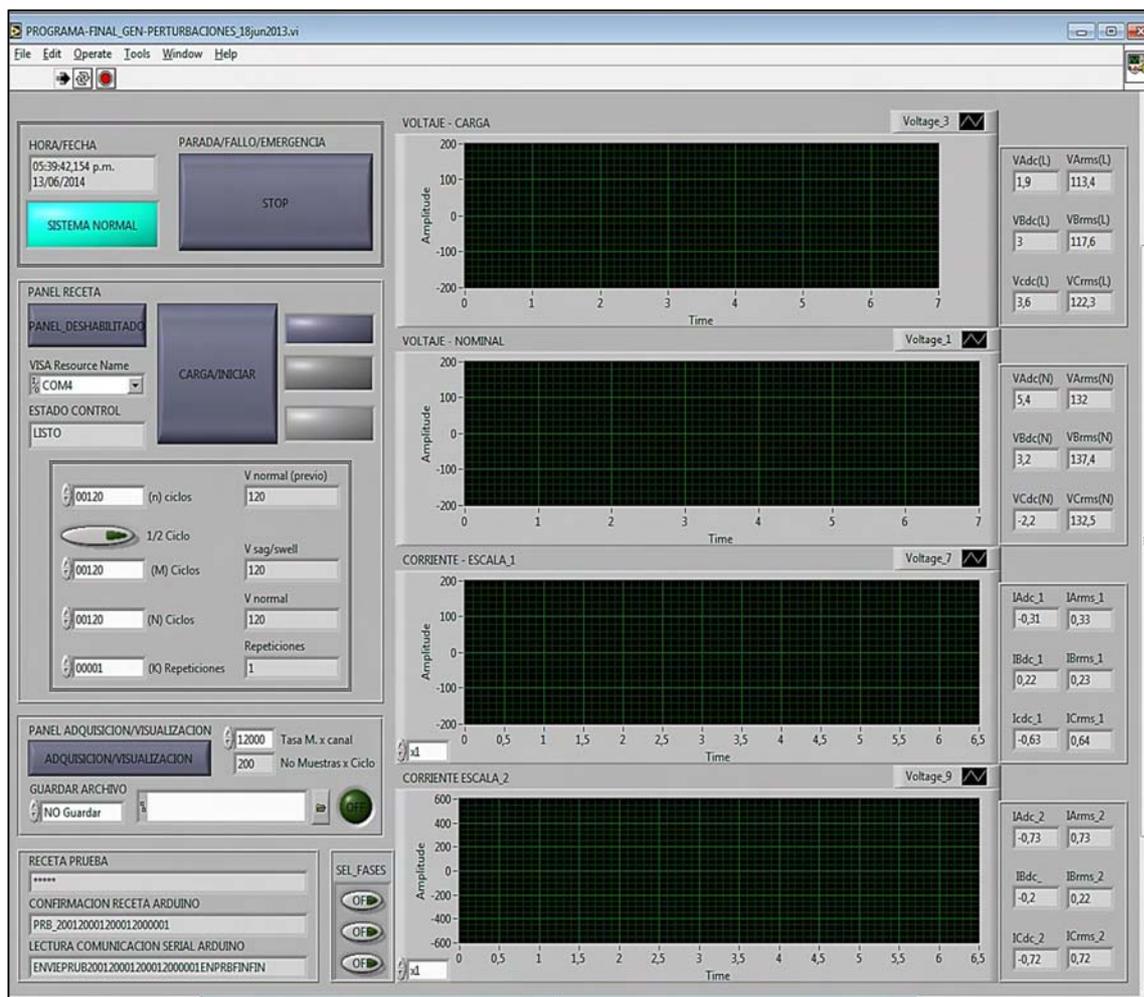
Figura 4-28: Imagen del diagrama de bloques del programa en LABview.



El PC se utiliza como interfaz gráfica y hombre máquina (GUI-HMI) para programar la prueba e interactuar con el usuario. Para la adquisición de los datos de la prueba (voltajes/corrientes) se utiliza una tarjeta DAQ PCI-MIO-16E-4 (NI PCI-6040E) conectada en el puerto interno PCI y el software Labview (versión 8.2, licencia disponible en la UNAL, a la fecha del desarrollo de esta Tesis).

Este software permite la presentación de los datos de la prueba en una pantalla o monitor. Específicamente los datos son: Señales de Voltaje y señales de Corriente, y sus valores R.M.S. y promedio, tiempo, y estados del equipo. El registro de los datos de la prueba es opcional y disponible en formato TDMS (para Excel) y en formato Txt.

**Figura 4-29:** Interfaz GUI-HMI generador trifásico de perturbaciones de tensión.



En la Figura 4-29 se presenta la interfaz GUI-HMI diseñada en LabVIEW (Panel de Control), en donde se tienen los siguientes elementos:

**Hora/Fecha:** Presenta la hora y fecha para el registro de los datos de la prueba, esta hora y fecha son tomadas del PC.

**Botón de Stop:** Este botón puede ser activado por el usuario utilizando un mouse o el touchpad del teclado. Adicionalmente, cambia de color a “rojo” cuando hay un fallo/alarma y/o parada de emergencia con el interruptor de seta.

**Botón panel Receta:** Este botón habilita/deshabilita el panel para programar la prueba, cuando está habilitado el panel cambia a color “verde”.

**Visa Resource Name:** Este es un selector para escoger el puerto de comunicación con la tarjeta Arduino ONE, en la inicialización del equipo se debe escoger COM4.

**Estado Control:** Estado reportado por el control en el Arduino, en estado normal reporta: “Listo”, en estado de fallo/alarma/parada de emergencia reporta: “fallo”.

**Botón cargar/iniciar:** botón de control usado cuando ya están programadas las especificaciones de la prueba para que el PC le ordene al control Arduino el inicio de la ejecución de la prueba. El usuario debe activarlo cuando este seguro de iniciar la ejecución de la prueba, una vez activado cambia de color a “verde”.

**Menú de especificaciones de la prueba:** se compone de una serie de controles que permiten introducir los datos de la prueba, como: número de ciclos de voltaje nominal previo (n), número de ciclos de voltaje de perturbación (M), número de ciclos de voltaje posterior (N), y número de repeticiones de la prueba. Estos valores pueden verificarse en los indicadores numéricos correspondientes. El número puede ser programado desde 0 hasta 99999.

**Botón ½ ciclo:** Este control cuando está seleccionado cambia a color “verde” mostrando que la prueba a realizar es una prueba tipo 2 con una duración de la perturbación de

tensión de solo medio ciclo, si no se selecciona el generador asumirá que la prueba es tipo 1 con perturbaciones en ciclos completos.

**Indicadores de estado de la prueba:** Son tres indicadores luminosos al lado derecho del botón de cargar/iniciar, que sirven para una indicación visual del estado actual de la prueba, el primero indica “en prueba” y cambia a color amarillo, el segundo indica “adquisición” y cambia a color naranja, y el tercero indica “Fin de la prueba” y cambia a color rojo.

**Botón adquisición/visualización:** Permite activar/desactivar la adquisición y visualización de la prueba.

**Botón ON/OFF:** Este botón de control permite activar/desactivar el registro de los datos de la prueba.

**Control guardar Archivo:** Este control permite escoger el formato del archivo de salida de los datos de la prueba, este formato puede ser TDMS para Excel, o un archivo de texto Txt. Adicionalmente, tiene un control para encontrar/administrar la carpeta en la cual se desea guardar el archivo.

**Receta de la prueba:** es un indicador de control de comunicación para que el usuario pueda verificar la trama de datos enviada del PC al Arduino con la información de la prueba.

**Confirmación receta de la prueba:** es un indicador de control de comunicación para que el PC y el usuario puedan verificar la trama de datos enviada desde el Arduino con la información de la prueba.

**Lectura comunicación serial:** es un indicador de control de comunicación para que el usuario pueda verificar la trama de datos entre el PC y el Arduino. Este control se incluye por su utilidad en caso de presentarse problemas de funcionamiento.

**Control SEL\_Fases:** Este control permite seleccionar la cantidad de fases que el usuario quiere visualizar en la pantalla.

**Controles Graficadores:** son cuatro graficadores para la presentación de las Señales de voltaje y Corriente. En orden descendente el primer graficador es para la presentación de las señales de voltaje en la carga o equipo en prueba (EUT). El segundo graficador es para la presentación de las señales de voltaje nominal ( $U_n$ ). El tercer graficador es para la presentación de las señales de corriente en la carga o equipo en prueba provenientes del sensor de rango 0-200 Amperios, este tiene un selector multiplicador x1 o x100 para permitir la visualización de señales pequeñas. El cuarto graficador es para la presentación de las señales de corriente en la carga o equipo en prueba provenientes del sensor de rango 0-600 Amperios, este graficador tiene un selector multiplicador x1 o x100, y es utilizado para la presentación de sobrecorrientes y fenómenos transitorios como los picos “Inrrush”.

**Indicadores de Valor R.M.S y D.C.:** Estos indicadores ubicados al costado derecho de los graficadores presentan los valores R.M.S y D.C. de los voltajes y corrientes.

## CONFIGURACION INTERFAZ HMI-GUI

En la Figura 4-30 se puede apreciar un ejemplo de configuración de prueba, en donde son claramente visibles los indicadores de estado, en azul el indicador de estado del equipo que se encuentra en “NORMAL”, y los indicadores de las etapas de la prueba como son: en prueba “AMARILLO”, en adquisición de datos “ADQUISICIÓN”, estado de finalización de la prueba “FIN PRUEBA”. También se puede apreciar la configuración del puerto de comunicación “COM4” con el control de secuencia de disparo basado en Arduino.

En cuanto al menú de prueba se puede configurar no solo el número de ciclos de cada etapa de las pruebas: # ciclos voltaje nominal previo, # ciclos voltaje perturbación, # ciclos voltaje nominal posterior, y el número de repeticiones, sino que también es posible programar el tipo de prueba: ciclos completos,  $\frac{1}{2}$  ciclo, o  $\frac{1}{4}$  de ciclo.

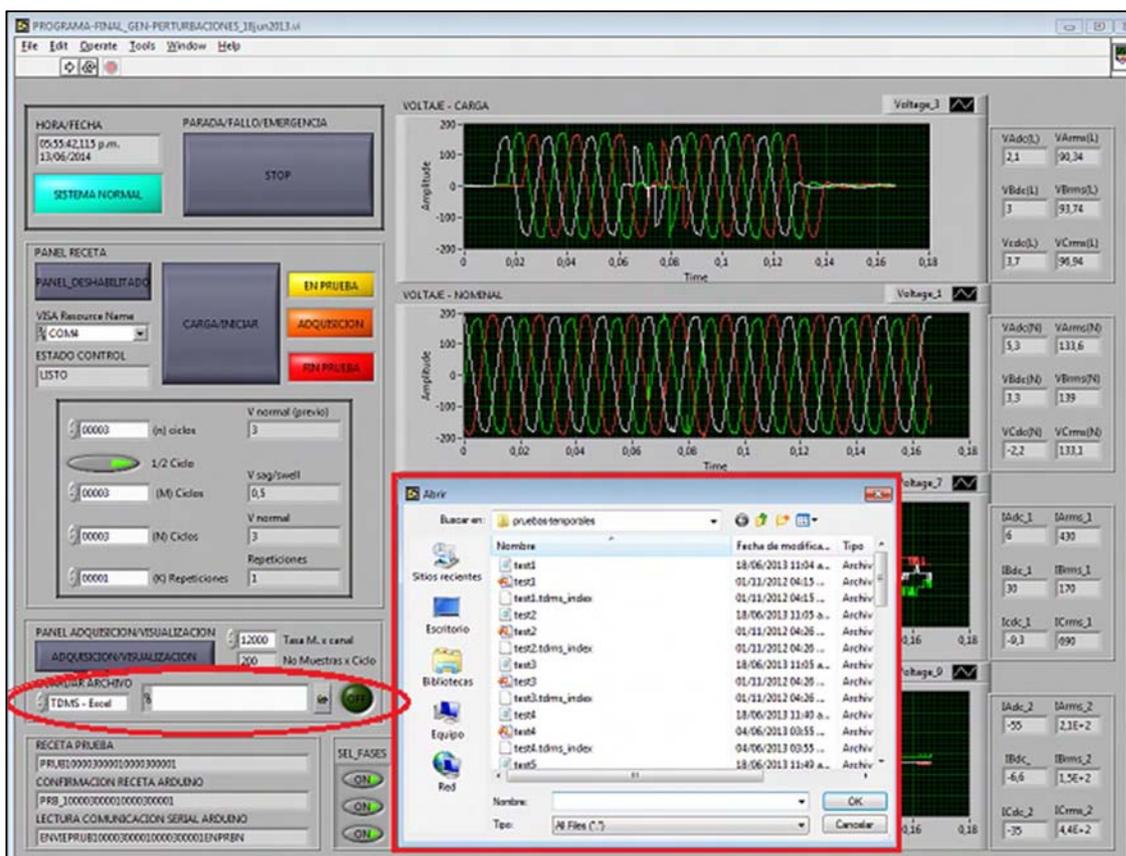
En la Figura 4-30 se muestra como en el menú de adquisición se puede escoger el tipo de archivo de salida de los datos registrados en una prueba (tiempos, voltajes, corrientes). En el ejemplo se escoge el tipo de archivo .tdms que es compatible con Excel

(esta compatibilidad se da por la instalación de un plug-in para Excel, que puede descargarse directamente desde la página de National Instruments, plug-in: NITDMEXCEL\_14-0-0.exe, página web: [www.ni.com/example/27944/en/](http://www.ni.com/example/27944/en/)).

Adicionalmente, es posible escoger la tasa de muestreo de una prueba lo que permite obtener una mayor sensibilidad pero con archivos de mayor tamaño o viceversa, se pueden obtener archivos menos pesados escogiendo una tasa de muestreo menor aunque esto pueda afectar la sensibilidad de la medición.

Nótese que es posible escoger el nombre del archivo y la carpeta para guardar el mismo, en caso que no se quiera escoger un nombre y carpeta específicos el programa guarda automáticamente en una carpeta de “Pruebas Temporales” ubicada en el escritorio de Windows, y nombra de forma consecutiva los archivos como “test\_#”.

**Figura 4-30:** Configuración del menú para registro de datos de una prueba, TDMS (Excel).



En la Figura 4-31 se presenta el archivo de datos en formato .tdms utilizando Excel, correspondiente a los datos registrados/almacenados de la prueba del ejemplo de la Figura 4-31. Este ejemplo corresponde a una interrupción simétrica de tensión, de magnitud 0% y duración ¼ Ciclo, y con tres ciclos de voltaje nominal previo y posterior a la perturbación.

Figura 4-31: Ejemplo archivo TDMS (Excel), registro de datos de una prueba.

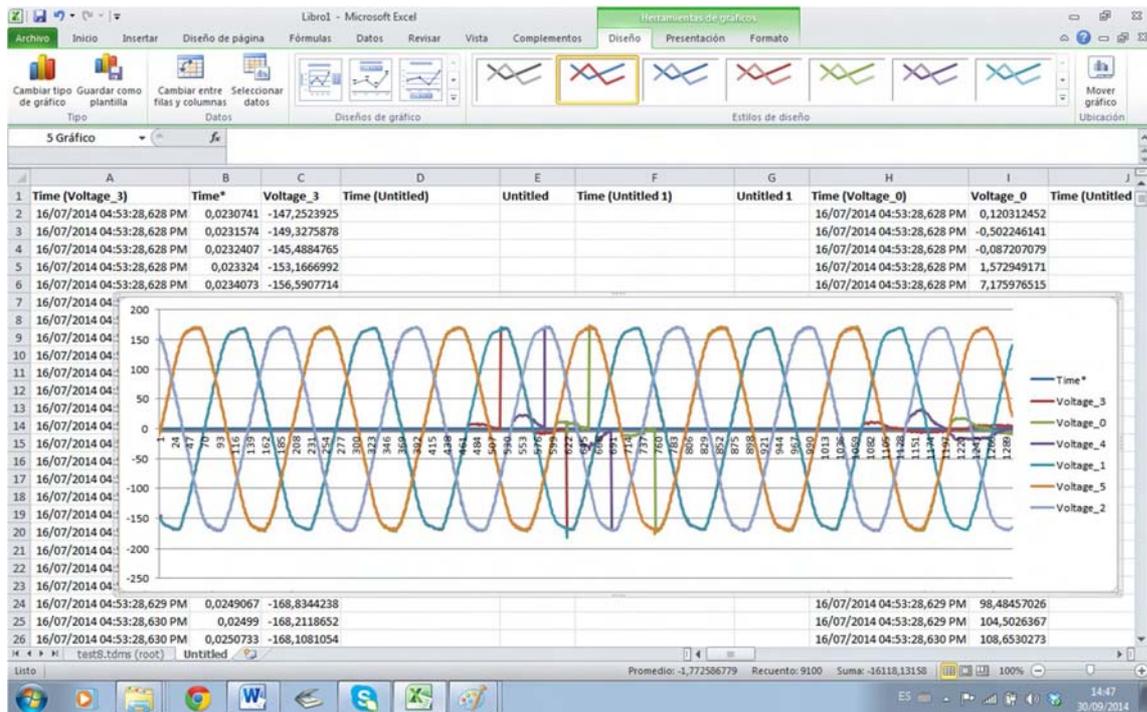
Root Name	Title	Author	Date/Time	Groups	Description						
test8.tdms		Admin		1	ARCHIVO DE REGISTRO DE PRUEBA DE SAG/SWELL						
Group	Channels	Description	wf_xcolumns								
Untitled	72	Multiple									
Channel	Datatype	Unit	Length	Minimum	Maximum	Description	NI_ChannelName	NI_ExpRelative	NI_ExpStartTimeStamp	NI_ExpTimeStamp	NI_ExpX
Time (Voltage_3)	DT_DATE	s	1800								
Voltage_3	DT_DOUBLE		1800				Voltage_3	0	16/07/2014 04:53:28,605 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Time (Untitled)	DT_DATE	s	1				Untitled	0	16/07/2014 04:53:28,761 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Untitled	DT_DOUBLE		1				Untitled 1	0	16/07/2014 04:53:28,760 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Time (Untitled 1)	DT_DATE	s	1								
Untitled 1	DT_DOUBLE		1				Untitled 1	0	16/07/2014 04:53:28,760 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Time (Voltage_0)	DT_DATE	s	1800								
Voltage_0	DT_DOUBLE		1800				Voltage_0	0	16/07/2014 04:53:28,604 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Time (Untitled 2)	DT_DATE	s	1				Untitled 2	0	16/07/2014 04:53:28,760 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Untitled 2	DT_DOUBLE		1				Untitled 2	0	16/07/2014 04:53:28,760 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Time (Untitled 3)	DT_DATE	s	1				Untitled 3	0	16/07/2014 04:53:28,760 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Untitled 3	DT_DOUBLE		1				Untitled 3	0	16/07/2014 04:53:28,760 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Time (Voltage_4)	DT_DATE	s	1800								
Voltage_4	DT_DOUBLE		1800				Voltage_4	0	16/07/2014 04:53:28,605 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Time (Untitled 4)	DT_DATE	s	1				Untitled 4	0	16/07/2014 04:53:28,760 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Untitled 4	DT_DOUBLE		1				Untitled 4	0	16/07/2014 04:53:28,760 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Time (Untitled 5)	DT_DATE	s	1				Untitled 5	0	16/07/2014 04:53:28,759 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t
Untitled 5	DT_DOUBLE		1				Untitled 5	0	16/07/2014 04:53:28,759 PM	16/07/2014 04:53:28,762 PM	t

Time (Voltage_3)	Time*	Voltage_3	Time (Untitled)	Untitled	Time (Untitled 1)	Untitled 1	Time (Voltage_0)	Voltage_0	Time (Untitled)
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0	0,50151372	16/07/2014 04:53:28,761 PM	0,054251485	16/07/2014 04:53:28,760 PM	94,89901611	16/07/2014 04:53:28,604 PM	-0,29472661	16/07/2014 04:53:28,605 PM
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,0000833	0,190234423					16/07/2014 04:53:28,605 PM	-0,08720709	
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,0001666	0,293994188					16/07/2014 04:53:28,605 PM	-0,502246141	
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,0002499	-0,536083937					16/07/2014 04:53:28,605 PM	-0,709765673	
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,0003332	-0,432324171					16/07/2014 04:53:28,605 PM	-1,332324266	
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,0004165	0,709033251					16/07/2014 04:53:28,605 PM	-1,332324266	
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,0004998	0,605273485					16/07/2014 04:53:28,605 PM	-0,709765673	
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,0005831	-0,432324171					16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,120312452	
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,0006664	-1,1584253					16/07/2014 04:53:28,605 PM	-1,124804735	
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,0007497	0,086474657					16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,3227831984	
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,000833	0,50151372					16/07/2014 04:53:28,605 PM	-1,332324266	
16/07/2014 04:53:28,605 PM	0,0009163	-0,951122999					16/07/2014 04:53:28,605 PM	-0,917285204	
16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,0009996	-1,588720655					16/07/2014 04:53:28,605 PM	-0,08720709	
16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,0010829	-1,262402296					16/07/2014 04:53:28,606 PM	-0,08720709	
16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,0011662	-1,469921827					16/07/2014 04:53:28,606 PM	-0,502246141	
16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,0012495	-0,121044874					16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,3227831984	
16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,0013328	-0,121044874					16/07/2014 04:53:28,606 PM	-1,747363329	
16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,0014161	-0,639843702					16/07/2014 04:53:28,606 PM	-0,29472661	
16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,0014994	0,190234423					16/07/2014 04:53:28,606 PM	-0,29472661	
16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,0015827	-0,017285109					16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,120312452	
16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,001666	-0,22480464					16/07/2014 04:53:28,606 PM	-0,29472661	
16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,0017493	-0,22480464					16/07/2014 04:53:28,606 PM	-0,709765673	
16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,0018326	-1,781201124					16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,535351515	
16/07/2014 04:53:28,607 PM	0,0019159	-0,121044874					16/07/2014 04:53:28,606 PM	-0,709765673	
16/07/2014 04:53:28,607 PM	0,0019992	-0,847363234					16/07/2014 04:53:28,606 PM	0,950390577	

Nótese en la Figura 4-31 que el archivo .tdms tiene dos hojas de cálculo, en la primera llamada test#.tdms(root) se presenta la información básica de la configuración de la prueba, en la segunda hoja de cálculo llamada "Untitled" se presentan los datos registrados de la prueba en cada instante de tiempo (columna B: Time) de los voltajes y corrientes.

En la Figura 4-32 se presenta las gráficas de los voltajes obtenidas en Excel a partir de los datos registrados del ejemplo presentado en la Figura 4-30, Nótese como las señales de voltaje graficadas corresponden fielmente a las presentadas en tiempo real por la interfaz GUI-HMI, hay que tener en cuenta que han sido sobrepuestas las gráficas de los voltajes nominales y los voltajes en la carga.

**Figura 4-32:** Ejemplo archivo TDMS (Excel), presentación de las señales registradas.

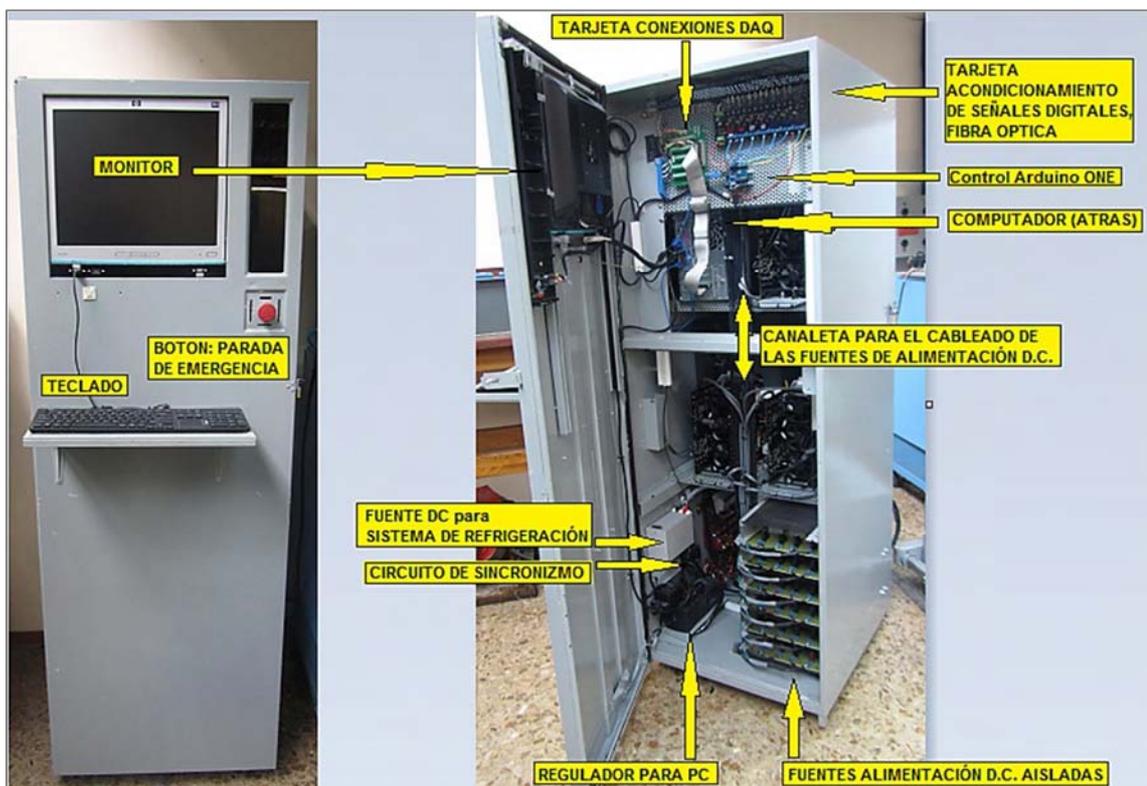


### 4.2.8 Montaje e Integración de los módulos del generador trifásico de perturbaciones de tensión

En la Figura 4-33 se presenta el montaje e integración de los módulos que componen el generador trifásico de perturbaciones de tensión en el armario del equipo. El armario del equipo es metálico soportado en ruedas metálicas, tiene paneles internos y canaletas en lámina perforada que permitirán la fijación de las tarjetas y módulos. Estos paneles y canaletas también sirven como elementos de blindaje. Todas las partes metálicas del equipo tienen conexión a masa (Tierra), incluyendo las puertas.

En la puerta frontal esta montados el monitor LCD, el teclado y el botón de parada de emergencia tipo seta de color rojo. Nótese que en la parte frontal también existen extensiones de puertos USB para la conexión de memorias, y otros dispositivos. En la Figura 4-33 se puede apreciar la disposición de los cables de potencia, VGA, y USB.

**Figura 4-33:** Montaje e integración de los módulos en el generador trifásico de perturbaciones de tensión, VISTA FRONTAL.



En la Figura 4-33 se puede apreciar la disposición de las fuentes de alimentación DC aisladas, estas se encuentran sobre soportes plásticos a una adecuada altura del piso del armario, su ubicación se realiza en un nivel bajo por el peso del conjunto total de fuentes. Las fuentes DC aisladas se conectan a los drivers de los interruptores bidireccionales por cableado de blindado de AWG14, este blindaje es conectado a un único punto en el piso del armario para evitar ruido. Adicionalmente, este cableado se distribuye a los interruptores por medio de canaletas en lámina metálica perforada. La fuente de alimentación DC del sistema de refrigeración (Ventiladores) se encuentra fijada lateralmente en la parte inferior, tiene un interruptor para su activación/desactivación manual.

En la parte superior de la vista frontal interna del armario mostrada en la Figura 4-33 se aprecia la disposición y montaje de la tarjeta de acondicionamiento de señales digitales, la tarjeta de control Arduino ONE, y la tarjeta de conexión de la DAQ, en el panel vertical. Adicionalmente, se puede observar la conexión por cable ribbon de la tarjeta de conexiones DAQ y el puerto en el PC. Para facilitar la conexión de todos los puertos del PC este se monta sobre un panel superior horizontal con su parte posterior apuntando a la frontal del equipo, esto es necesario porque por la construcción del armario y por el tamaño y peso del PC no es posible otra ubicación interna. Aunque esto facilita la conexión de puertos dificulta el encendido del PC.

En la Figura 4-34 se presenta la vista de atrás interna del armario del equipo generador, por la forma y tamaño de los interruptores bidireccionales estos se montan sobre paneles horizontales. Los cables de potencia se llevan a los interruptores por canaleta en lámina perforada desde los barrajes e interruptores termomagnéticos ubicados en la parte inferior, por donde ingresan los cables de potencia de conexión de la carga (equipo en prueba, EUT), y los voltajes nominal y de perturbación. Las tarjetas y sensores de medición de corrientes se instalan lateralmente junto a cada uno de los interruptores bidireccionales para facilitar su conexión. La tarjeta de acondicionamiento de señales de voltaje se instala lateralmente en el costado derecho, para facilitar la conexión de las señales de la manera más cercana posible a la tarjeta de conexión de la DAQ, con esto se evita que las señales se atenúen. Todas las conexiones de voltaje y señales hacia y desde la tarjeta de acondicionamiento de señales de voltaje se realizan por cable blindado AWG14, los blindajes se conectan por un único punto al armario metálico.

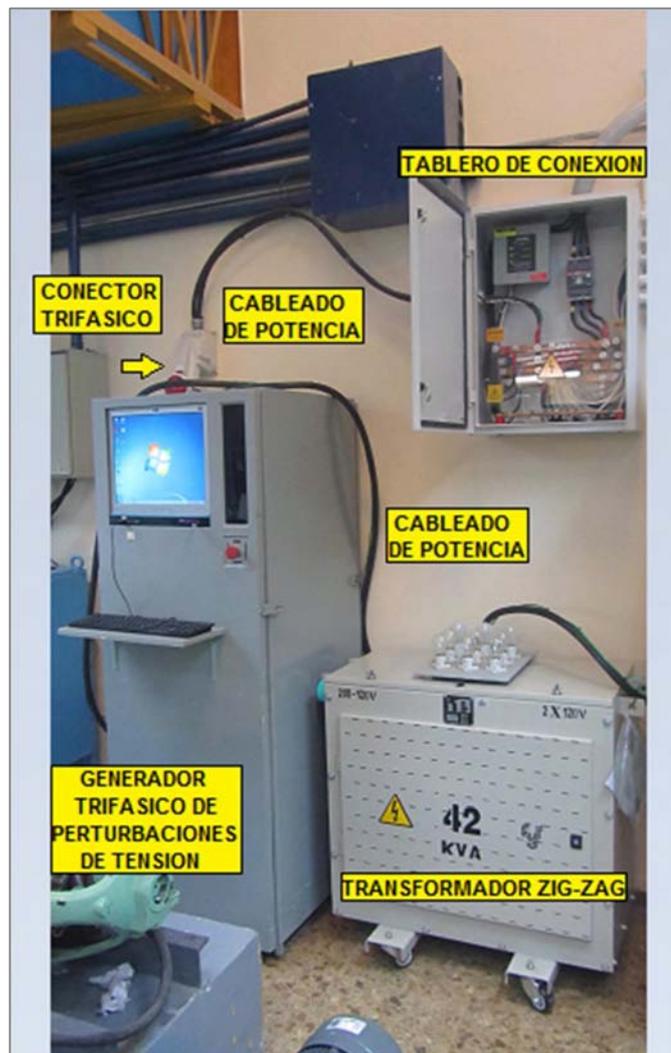
**Figura 4-34:** Montaje e integración de los módulos en el generador trifásico de perturbaciones de tensión, VISTA DE ATRÁS.



En la Figura 4-35 se muestra la instalación del generador trifásico de perturbaciones de tensión en el laboratorio de máquinas eléctricas del departamento de ingeniería eléctrica y electrónica de la facultad de ingeniería de la universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.

En donde se puede apreciar la disposición y conexión del generador y el transformador Zig-Zag. También, puede observarse el armario de conexión del sistema de alimentación trifásico que incluye los barrajes de conexión y un interruptor termomagnético de protección de la red eléctrica. El transformador se conecta a través de un enchufe y un tomacorriente empotrado trifásico de cinco hilos, para los Voltajes de fases X, Y, Z, Neutro y Tierra. La tierra se conecta al armario del equipo generador y el transformador Zig-Zag.

**Figura 4-35:** Instalación del generador trifásico de perturbaciones de tensión.



## RESUMEN CAPITULO

Dado que el generador de perturbaciones de tensión requiere del registro de las señales eléctricas durante una prueba, es necesario obtener dichas señales, para esto se diseñó el módulo de instrumentación y acondicionamiento de señales de corriente y voltaje. En la implementación de este módulo se decidió diseñar dos tarjetas electrónicas diferentes: una para adquisición de las señales de corriente (una por fase), y otra para la adquisición de todas las señales de voltaje (3 fases: 6 voltajes). Esto es porque para la integración de las tarjetas al equipo era más práctico.

Para la medición de corriente en cada una de las fases se emplean dos sensores de efecto hall, que poseen aislamiento y tienen rangos diferentes. El sensor de corriente de rango 0-200A se utiliza para la medición de las señales en el equipo en prueba (EUT), son una precisión del 1% (a ful escala). El sensor con rango 0-600A utiliza para cubrir el rango de medición de sobrecorrientes tales como los picos inrush. El diseño de las tarjetas de acondicionamiento basadas en amplificadores operacionales, su implementación y calibración se desarrolló satisfactoriamente.

Para la medición de voltaje se desarrolló una sola tarjeta que mide y acondiciona las señales de los voltajes nominales y los voltajes de perturbaciones para cada fase, procedentes del transformador Zig-Zag. Por costos y precisión se utiliza un divisor resistivo 1776-C81, y se diseña una tarjeta de acondicionamiento basada en amplificadores de instrumentación aislados ISO-124. Su implementación y calibración se desarrolló satisfactoriamente.

El sistema de control requirió el desarrollo de dos módulos, debido a que las tareas necesarias no pueden ser soportadas por una sola plataforma, porque adquirir y registrar las señales, sincronizarse con la red, controlar los interruptores de potencia y supervisar los estados del equipo (alarmas de fallo) al mismo tiempo no es posible. Para ello se estableció la arquitectura de la Figura 4-9, en la cual el control se divide jerárquicamente en dos niveles, el primero es un módulo de alto nivel de gestión, que incluye la interfaz GUI-HMI para la programación de las pruebas y el registro de datos de las mismas, soportado en un PC y software labview. El segundo un módulo microcontrolado que se

encarga de la sincronización y control de los interruptores IGBT, y la revisión de los estados del equipo (alarmas de fallo). En el desarrollo del equipo se demostró que la funcionalidad de esta arquitectura es una gran ventaja, por la distribución de tareas.

Para el acondicionamiento de las señales digitales de control se diseñó e implemento una tarjeta para recepción y transmisión por fibra óptica. Este demostró ser un método bastante eficiente y con excelentes características de aislamiento y compatibilidad electromagnética.

Se diseñó una interfaz GUI-HMI, en Labview la cual es bastante funcional y permite la programación de la prueba de inmunidad. Para lo cual se tiene un menú de prueba, que permite el ingreso del número de ciclos para la conexión de los voltajes nominales: previo y posterior, permite el ingreso del número de ciclos para la conexión del voltaje de perturbación entre 1 y 99999 ciclos completos, y también permite la programación de un numero de repeticiones entre  $\frac{1}{2}$  ciclo y 99999 ciclos completos. Esto supera ampliamente la capacidad deseada originalmente, y habré la posibilidad de no solo realizar pruebas de inmunidad sino también pruebas de envejecimiento de equipos.

En el diseño de la programación en Labview se incluyó la visualización y el registro de los datos de las pruebas, específicamente los voltajes y corrientes en función del tiempo. Para lo cual en el menú de adquisición y visualización, se permite escoger si al realizarse la prueba se quiere guardar la información y en qué tipo de archivo. En cuanto al tipo de archivo se pueden escoger dos opciones .tdms que es compatible con Excel, y .txt que corresponde a texto plano. A su vez se demostró como a partir de los datos almacenados es posible su procesamiento y visualización posterior.

Finalmente, en el montaje e integración de todos los módulos del equipo se tuvieron en cuenta criterios de compatibilidad electromagnética y seguridad eléctrica. Se tuvo en consideración el uso de barrajes, protecciones, apantallamientos, cables blindados, canaletas metálicas, conexiones de masa (Tierra), y una disposición adecuada de los módulos para su acceso, verificación, calibración, etc...

## **5. Pruebas del Generador de Perturbaciones**

Una vez terminado el montaje del generador de trifásico de perturbaciones de tensión se realizaron una serie de pruebas de funcionamiento para demostrar sus capacidades, versatilidad y funcionalidad.

También se realizaron pruebas destinadas a demostrar que el generador de perturbaciones tiene la capacidad de realizar pruebas completas de inmunidad de equipos.

### **5.1 Protocolo de Prueba**

Para el encendido del equipo generador de perturbaciones y la puesta en marcha de una prueba es necesario seguir un protocolo de prueba. Es importante tener en cuenta que este protocolo de prueba debe desarrollarse de forma estricta, dadas las características propias del equipo y la carencia de un mando de control y protecciones suficientes (como se mencionó anteriormente, debido a las limitaciones de presupuesto).

Este protocolo es necesario para proteger al operador y al equipo, a continuación se listan los pasos necesarios antes, durante y al finalizar una prueba.

- 1) Antes de energizar el equipo, conecte la carga o equipo en prueba EUT, y verifique nuevamente la conexión según la disposición deseada.
- 2) Antes de energizar el equipo, conecte los Taps del transformador Zig-Zag trifásico de acuerdo a los voltajes deseados, y verifique.

- 3) Conectar/Energizar el transformador y verificar los voltajes deseados para  $V_{\text{nominal}}$  y  $V_{\text{perturbación}}$ , para ello use multímetro y/o osciloscopio.
- 4) Accionar/Cerrar el interruptor de  $V_{\text{nominal}}$  para energizar el equipo generador de perturbaciones.
- 5) Dependiendo del tipo de prueba activar/desactivar los ventiladores de refrigeración de los interruptores de potencia (desactivar para pruebas con baja carga).
- 6) Encender computador y monitor, esperar que Windows termine de cargar.
- 7) Abrir el programa-aplicación interfaz HMI-GUI en labview, "Aplicación Generador de perturbaciones", para lo cual existe un acceso directo en el escritorio de Windows.
- 8) Habilitar programa labview, activando el icono de programa "on".
- 9) Programar una secuencia de prueba para sincronizar el equipo y para que este pueda verificar los estados de alarma de las protecciones (protecciones: sobrecorriente, desaturación de los transistores, sobretemperatura, parada de emergencia).

Para lo cual, en el menú escoja el puerto de comunicación "Visa Resource Name" en "COM4" y programe la siguiente secuencia de "prueba": 1 ciclo para  $V_{\text{nom\_anterior}}$ , 1 ciclo para  $V_{\text{perturbacion}}$ , 1 ciclo para  $V_{\text{nom\_posterior}}$ , y 1 repetición.

Sin Accionar/Cerrar los interruptores de conexión de carga y de Voltaje de perturbación, correr la secuencia de prueba activado el botón de "CARGAR/INICIAR" en el menú. Dado que la carga/EUT y el voltaje de perturbación no han sido conectados el equipo deberá presentar gráficamente el voltaje nominal como voltajes adquiridos tanto para voltaje nominal como para voltaje en la carga/EUT y corriente cero. Adicionalmente, indicara que el estado del generador: "NORMAL"/"FALLO".

- 10) En caso de presentar un estado de "FALLO", en primera instancia se debe verificar la posición del interruptor de parada de emergencia, en segunda instancia se debe verificar las alarmas de fallo (led de estado Rojos) de los interruptores de potencia en la tarjeta de acondicionamiento de señales digitales e interfaz para fibra óptica.
- 11) Si el estado detectado es "NORMAL", se puede programar la secuencia de prueba en el menú de la interfaz HMI-GUI, para lo cual se debe escoger el tipo de prueba (1/4 Ciclo, 1/2 Ciclo, Ciclos completos), Y se debe ingresar la cantidad de ciclos: # ciclos para  $V_{nominal\_anterior}$ , # ciclos para  $V_{perturbación}$ , # ciclos para  $V_{nominal\_posterior}$ , y el número de repeticiones de la prueba.  
Adicionalmente, es posible programar si la prueba va a ser registrada en el menú de "ADQUISICION/VISUALIZACION" y el tipo de formato de salida: Archivo Excel .tdms, o archivo texto plano .txt.
- 12) Una vez programa la prueba, primero Accionar/Cerrar el interruptor de conexión del voltaje de perturbación, y luego Accionar/Cerrar el interruptor de conexión de la carga/EUT.  
Correr la secuencia de prueba activado el botón de "CARGAR/INICIAR" en el menú.
- 13) Una vez terminada la prueba desconectar los interruptores de Voltaje de perturbación y de la carga/EUT.
- 14) El archivo con la información de la prueba recibe una numeración automática y se guarda en la carpeta "Pruebas\_Temporal", ubicada en el escritorio de Windows.
- 15) Para apagar el equipo, primero apague el computador y el monitor, segundo desconecte el interruptor de Voltaje nominal, y tercero desconecte/desenergice el equipo.

## 5.2 Pruebas de Funcionamiento

Para demostrar la capacidad, versatilidad y funcionalidad del equipo en la generación de diferentes tipo de perturbaciones de tensión monofásicas y trifásicas se desarrollaron pruebas para producir: hundimientos de tensión simétricos, hundimientos de tensión asimétricos y hundimientos de tensión desbalanceados (Sag/Dip), elevaciones de tensión (Swell), Interrupciones de tensión (Outage), de acuerdo a las normas descritas en la Tabla 1-4, y fluctuaciones de tensión (flickers).

De acuerdo al tipo de perturbación se realizaron pruebas con diferentes tipos de carga, que permiten comprobar la capacidad del equipo generador de soportar adecuadamente diferentes tipos de carga/EUT. Para la carga de tipo resistivo (R) en las pruebas se usaron bombillas incandescentes de 120Vrms/60watts.

Para la carga de tipo Inductivo (RL) se utilizó un motor de inducción trifásico ABB de 220Vrms/440Vrms, 10HP, referencia M2QA132S2B. Para simular cargas electrónicas se utilizó un circuito rectificador con filtro RC y carga resistiva, específicamente se usó un arreglo de condensadores de 930uf y tres bombillas incandescentes de 120Vrms/60Watts en paralelo.

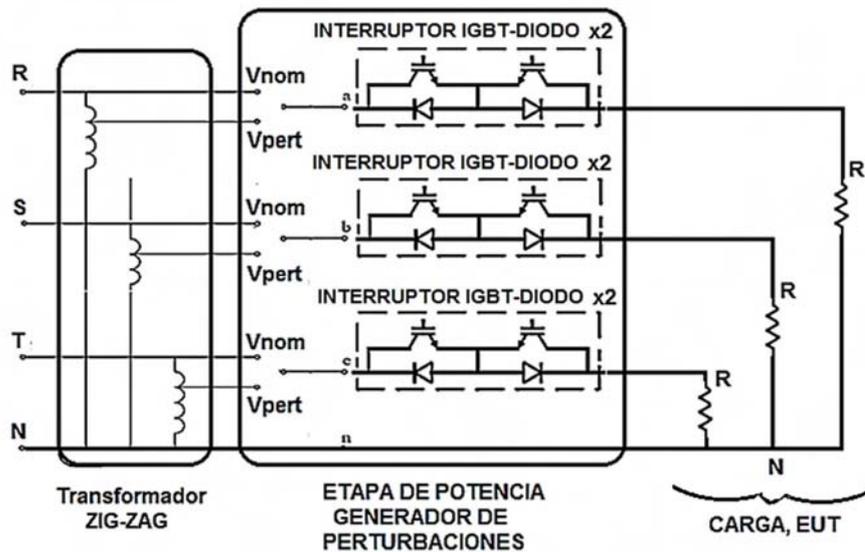
Se aclara, que ninguna prueba se diseñó para llevar al generador al límite de su funcionamiento, mucho menos la realización de pruebas destructivas puesto que el limitado presupuesto no permite el “sacrificio” de componentes, tarjetas, etc...

### 5.2.1 Pruebas de funcionamiento con carga Resistiva

#### Hundimiento de tensión trifásico simétrico

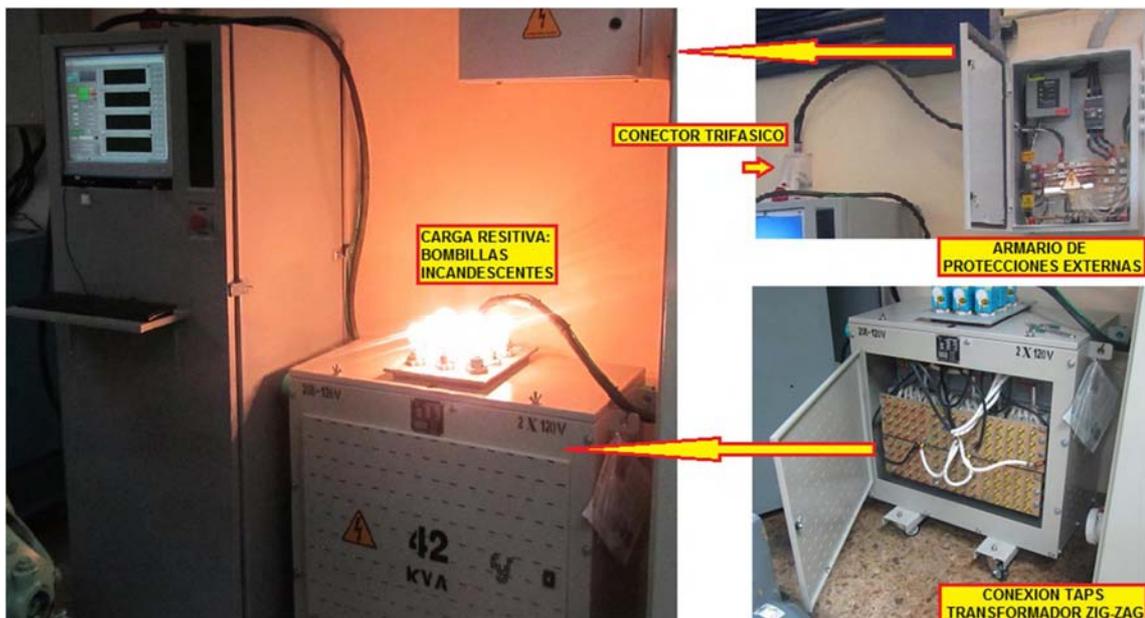
Para probar un Hundimiento de tensión con carga resistiva se ha conectado el equipo de acuerdo al esquema de la Figura 5-1, en donde se utiliza como carga/EUT un arreglo paralelo de tres bombillas incandescentes de 120Vrms/60W por fase.

**Figura 5-1:** Circuito de prueba con carga resistiva para el Generador trifásico de perturbaciones de tensión.



En la figura 5-2 se puede observar el montaje físico de las cargas y la conexión de los taps del transformador para producir un hundimiento de tensión con amplitud de 40% para cada fase.

**Figura 5-2:** Montaje de prueba con carga resistiva para el Generador trifásico de perturbaciones de tensión.

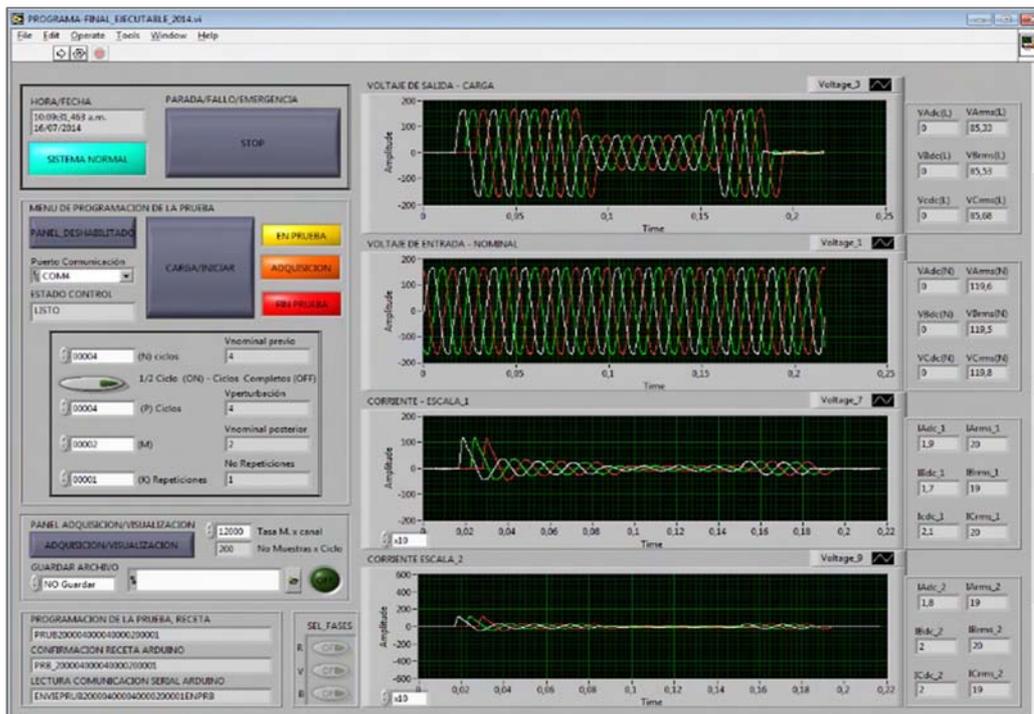


En la Figura 5-3 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 4 ciclos para  $V_{nom\_anterior}$ , 4 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 2 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , y 1 repetición. Adicionalmente, en la Figura 5-4 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 60 ciclos para  $V_{nom\_anterior}$ , 60 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 30 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , y 1 repetición.

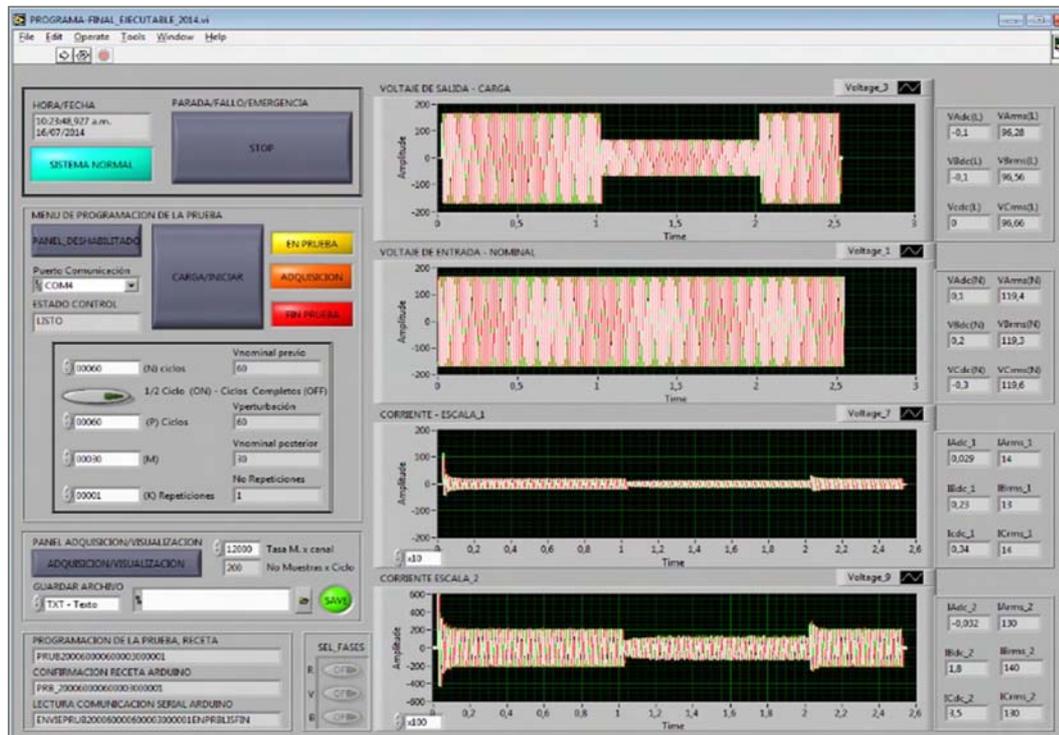
Esto con el fin de demostrar que el generador puede producir eventos tipo hundimiento (SAG/DIP) para pocos y muchos ciclos completos, es importante recordar que el generador puede ser programado como máximo hasta 99999 ciclos completos para  $V_{nom\_anterior}$ , máximo hasta 99999 ciclos completos para  $V_{perturbación}$ , máximo hasta 99999 ciclos completos para  $V_{nom\_posterior}$ , y hasta 99999 repeticiones de la prueba.

Analizando las pruebas ilustradas en las Figuras 5-3 y 5-4, se puede observar el pico de corriente inicial producido por el comportamiento no-lineal de las bombillas incandescentes, y como en presencia de la perturbación la corriente disminuye.

**Figura 5-3:** Resultados prueba hundimiento de tensión trifásico simétrico, Tipo 1: Para Pocos Ciclos completos, carga resistiva.



**Figura 5-4:** Resultados prueba hundimiento de tensión trifásico simétrico, Tipo 1: para Muchos Ciclos completos, carga resistiva.



## Hundimiento de tensión trifásico Asimétrico

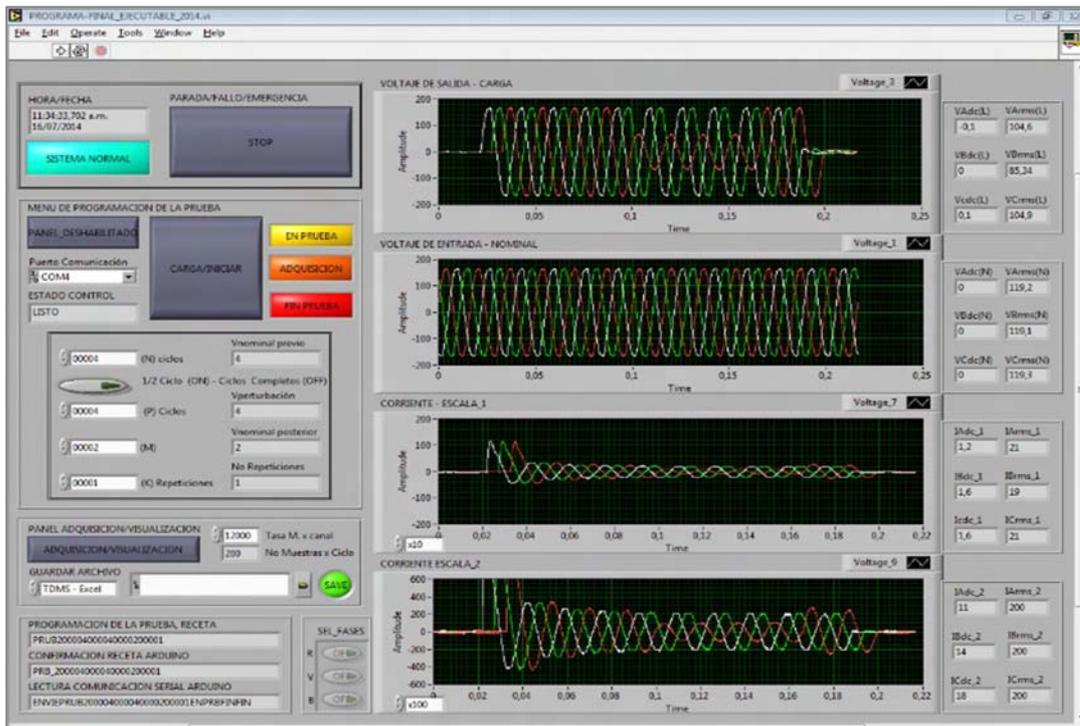
Para la prueba de un Hundimiento de tensión Asimétrico con carga resistiva se ha conectado el equipo de acuerdo al esquema de la Figura 5-1, en donde se utiliza como carga/EUT un arreglo paralelo de tres bombillas incandescentes de 120Vrms/60W por fase.

La asimetría del hundimiento se da porque el evento solo se produce en una de las tres fases, mientras que las otras dos fases no se produce perturbación. Esto se logra conectando en el transformador zig-zag dos voltajes de perturbación a 100%, y dejando solo una fase del voltaje de perturbación conectada a algún tap reductor (<100%), en la prueba realizada se escoge conectar el tap de 40%.

En la Figura 5-5 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 4 ciclos para  $V_{nom\_anterior}$ , 4 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 2

ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , y 1 repetición. Se escoge pocos ciclos para que sea más fácil de comprobar la generación del hundimiento asimétrico, tal como ocurre con la fase en color rojo.

**Figura 5-5:** Resultados de la prueba de hundimiento de tensión trifásico Asimétrico, con desbalance en una fase, Tipo 1: Para Pocos Ciclos completos, carga resistiva.

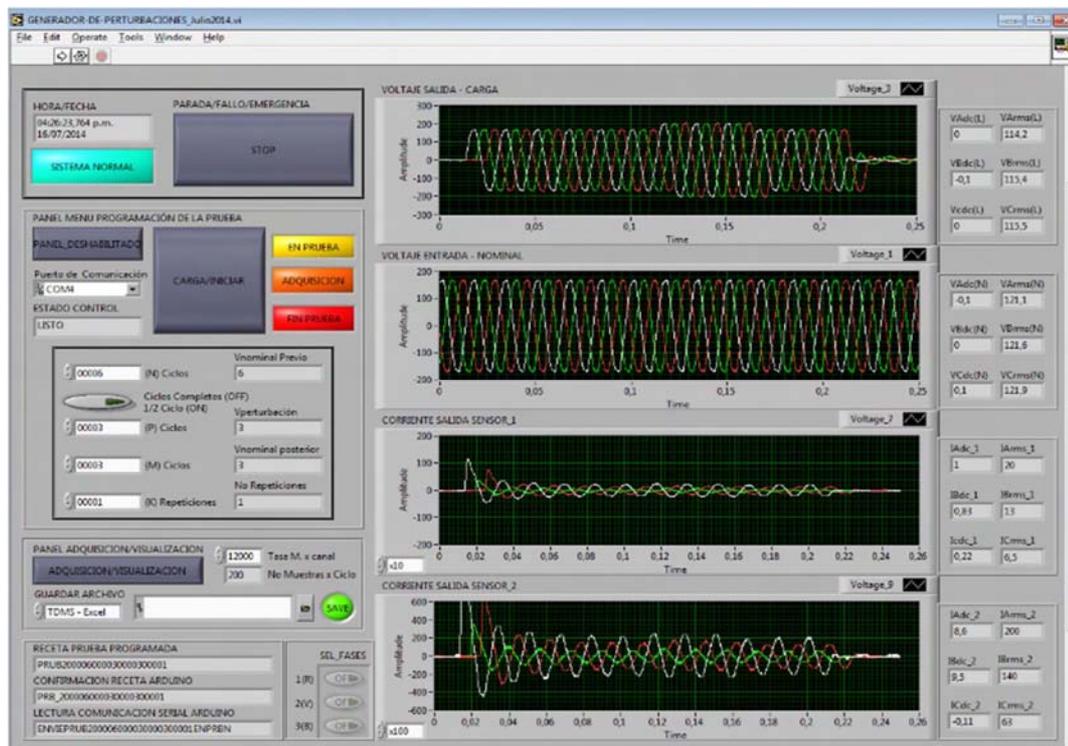


## Aumento de tensión (Swell) trifásico simétrico

Para la prueba de un aumento de tensión simétrico con carga resistiva se ha conectado el equipo de acuerdo al esquema de la Figura 5-1, en donde se utiliza como carga/EUT un arreglo paralelo de una, dos y tres bombillas incandescentes de 120Vrms/60W por cada una de las fases. La simetría del Incremento se da porque esta se produce en las tres fases de la misma forma, en este caso se conectan los voltajes de perturbación a los taps elevadores del transformador zig-zag. Específicamente para esta prueba se utilizan los taps de 120%.

En la Figura 5-6 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 6 ciclos para  $V_{nom\_anterior}$ , 6 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 3 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , y 1 repetición. Se escoge pocos ciclos para que sea más fácil de comprobar la generación del aumento simétrico. En donde se puede notar como el incremento en el voltaje durante la perturbación produce un incremento en la corriente de cada fase, que en este caso es diferente porque en esta oportunidad se ha decidido cómo se mencionó anteriormente colocar un valor de carga diferente para cada fase.

**Figura 5-6:** Resultados prueba aumento de tensión (Swell) trifásico simétrico de 120%.



### Interrupción de tensión de corta duración trifásica simétrica

Para la prueba de una interrupción de tensión de corta duración (equivalente a un hundimiento de amplitud 0%) se ha conectado el equipo de acuerdo al esquema de la Figura 5-1, en donde se utiliza como carga/EUT un arreglo paralelo de una, dos y tres bombillas incandescentes de 120Vrms/60W en cada una de las fases respectivamente.

La simetría de la interrupción se da porque esta se produce en las tres fases de la misma forma, en este caso se conectan los voltajes de perturbación a los taps de neutro (0%) del transformador zig-zag.

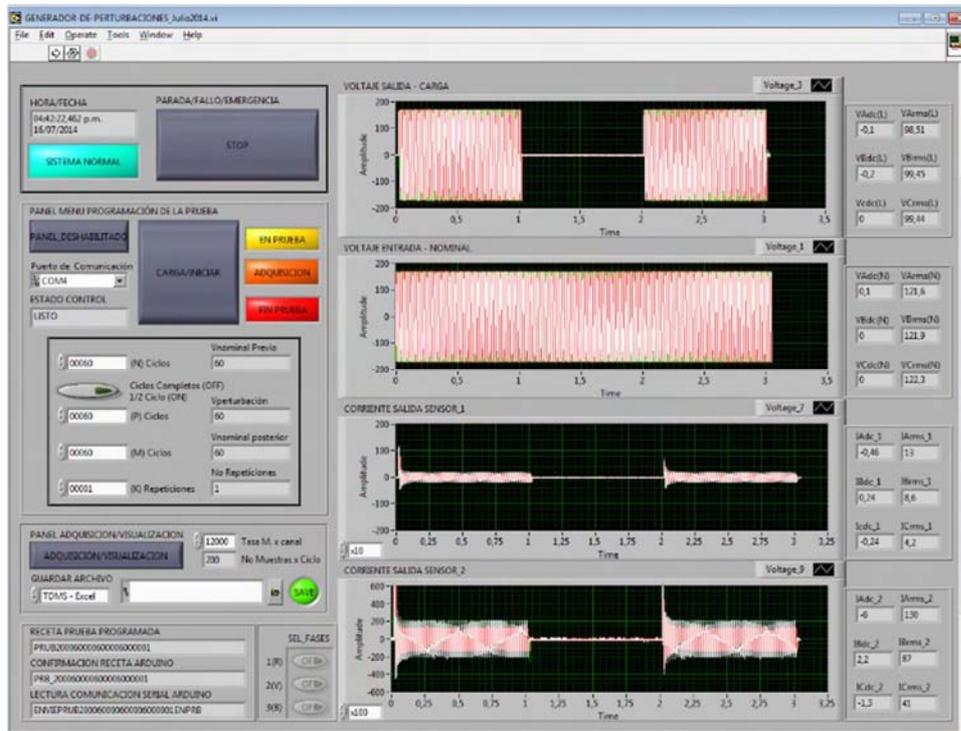
En la Figura 5-7 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 6 ciclos para  $V_{nom\_anterior}$ , 4 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 3 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , y 1 repetición. Se escoge pocos ciclos para que sea más fácil de comprobar la generación de la interrupción simétrica en ciclos completos.

**Figura 5-7:** Resultados prueba de Interrupción de Tensión simétrica (0%). Pocos ciclos completos.

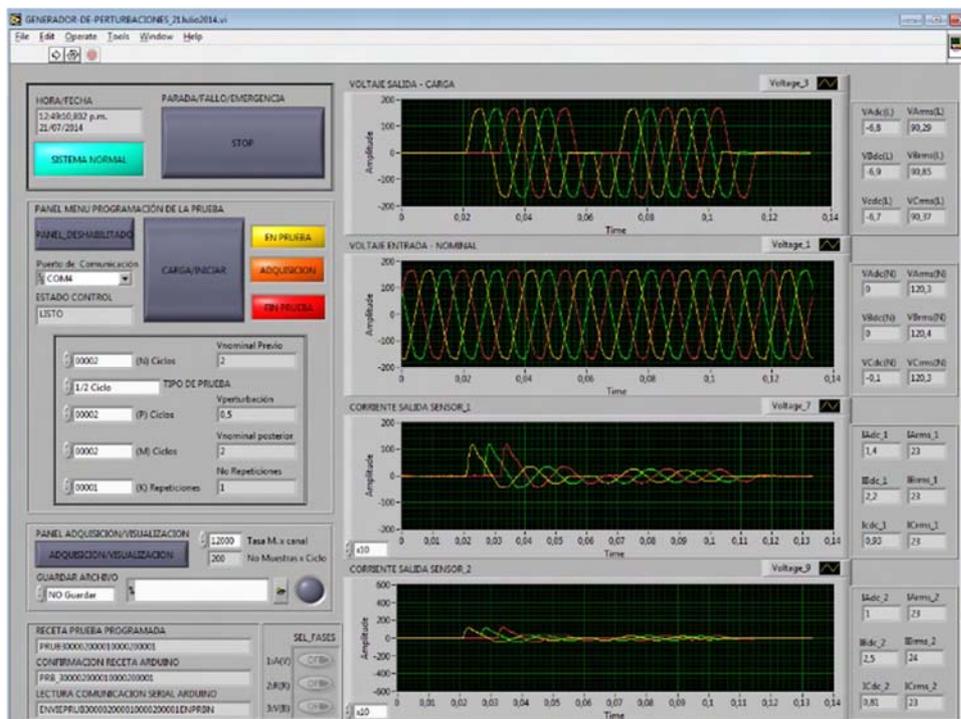


En la Figura 5-8 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 60 ciclos para  $V_{nom\_anterior}$ , 60 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 60 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , y 1 repetición. Se escoge muchos ciclos completos para comprobar que el equipo también puede realizar interrupciones de larga duración.

**Figura 5-8:** Resultados prueba de Interrupción de Tensión simétrica (0%). Muchos ciclos completos.



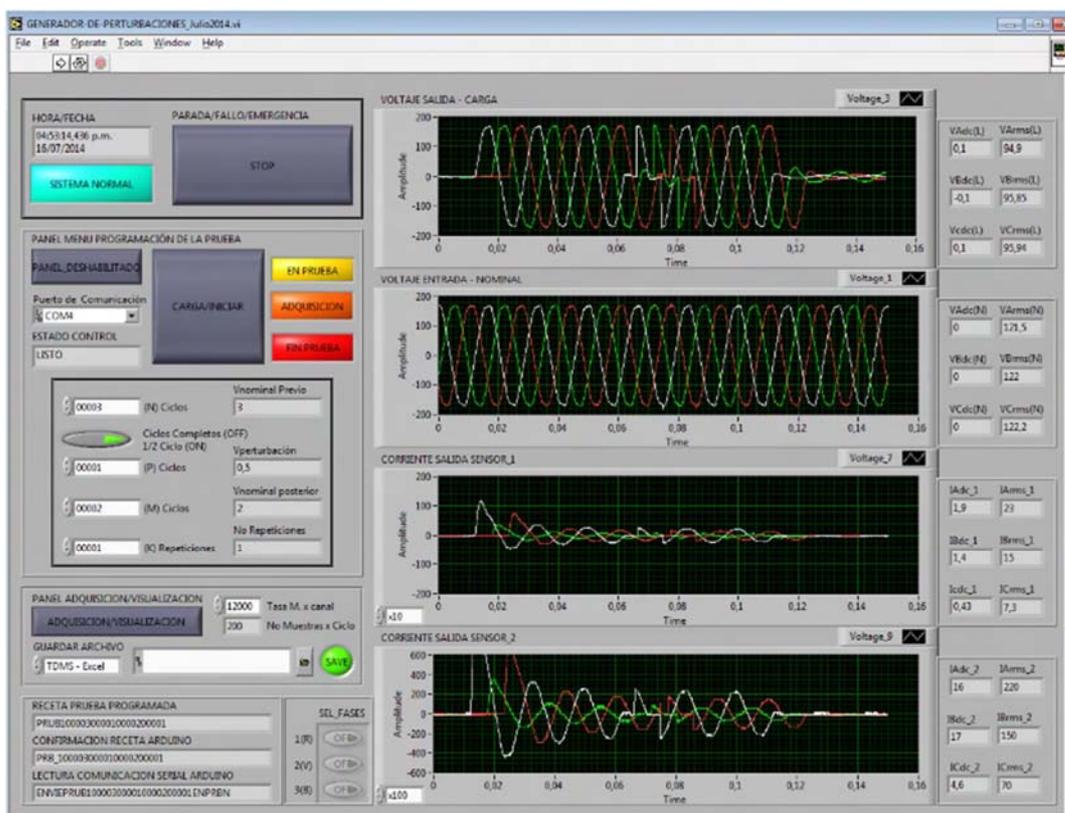
**Figura 5-9:** Resultados prueba de Interrupción de Tensión simétrica (0%), 1/2 Ciclo.



En la Figura 5-9 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 2 ciclos para  $V_{nom\_anterior}$ ,  $1/2$  ciclo para  $V_{perturbación}$ , 2 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , 1 repetición.

Adicionalmente, en la Figura 5-10 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 3 ciclos para  $V_{nom\_anterior}$ ,  $1/4$  de ciclo para  $V_{perturbación}$ , 2 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , y 1 repetición. Con el fin de comprobar que el generador puede producir interrupciones inferiores a un ciclo, específicamente de  $1/2$  ciclo y de  $1/4$  de ciclo requeridas de acuerdo a la normatividad [7] [8].

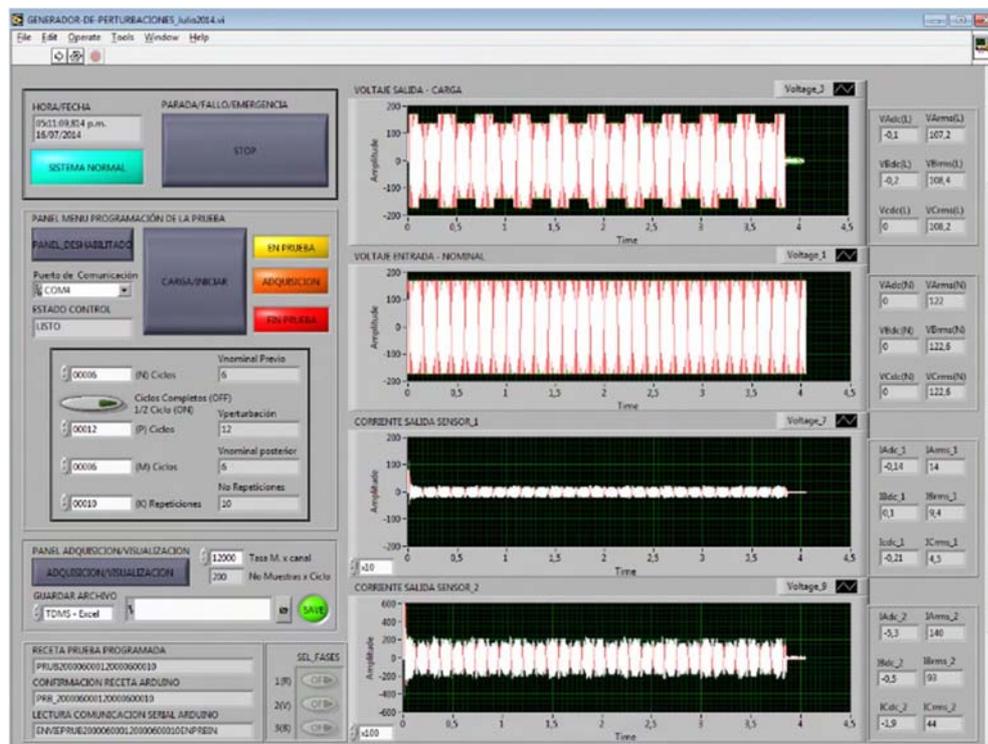
**Figura 5-10:** Resultados prueba de Interrupción de Tensión simétrica (0%),  $1/4$  de Ciclo.



## Fluctuación de tensión (Flicker tipo rectangular)

Aunque el propósito inicial del generador de perturbaciones no era producir fluctuaciones de tensión, es posible generar fluctuaciones rectangulares utilizando la función de repetición de prueba. Para la prueba de demostración de una fluctuación de tensión se conecta el equipo de acuerdo al esquema de la Figura 5-1, en donde se utiliza como carga/EUT un arreglo paralelo de una, dos y tres bombillas incandescentes de 120Vrms/60W en cada una de las fases respectivamente. La simetría de la interrupción se da porque esta se produce en las tres fases de la misma forma, en este caso se conectan los voltajes de perturbación a los taps de 80% del transformador zig-zag. En la Figura 5-11 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 6 ciclos para  $V_{nom\_anterior}$ , 12 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 6 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , y 10 repeticiones. Es importante recordar que las fluctuaciones producidas no corresponden con exactitud a una normatividad porque el diseño de taps del transformador zig-zag era muy difícil de lograr para esta aplicación.

**Figura 5-11:** Resultados prueba de fluctuación de tensión (flicker de tipo rectangular).



## 5.2.2 Pruebas de funcionamiento con carga RC

Las pruebas con carga RC representan al conjunto de equipos electrónicos monofásicos con etapas de entrada de rectificación y filtrado capacitivo. En este caso se configuró el generador para la producción de una perturbación tipo hundimiento de tensión monofásico. Específicamente se usó un puente rectificador referencia KBL10, y como carga un arreglo de condensadores de 930uf (paralelo: 600uf, 330uf/330V) y tres bombillas incandescentes de 120Vrms/60Watts en paralelo.

En la Figura 5-12 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 3 ciclos para  $V_{nom\_anterior}$ , 2 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 1 ciclo para  $V_{nom\_posterior}$ , 1 repetición. Nótese como se puede observar con claridad el hundimiento de tensión y su relación con la forma de onda de la corriente de la carga.

**Figura 5-12:** Resultados prueba de Hundimiento (SAG/DIP) para carga RC. Pocos ciclos completos.



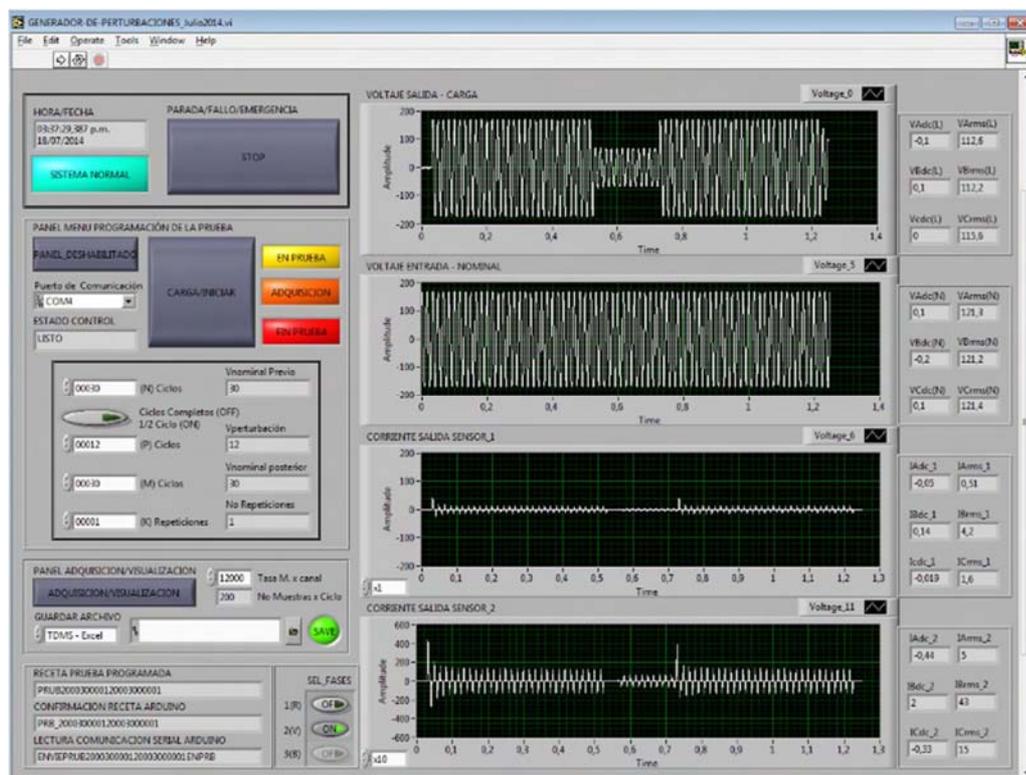
En la Figura 5-13 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 30 ciclos para  $V_{nom\_anterior}$ , 12 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 30 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , 1 repetición. Nótese como se puede observar con claridad el hundimiento de tensión y su relación con la forma de onda de la corriente de la carga, específicamente con el valor del pico de corriente.

Es importante recordar que las cargas RC en rectificadores producen picos de corriente elevados, esto es porque la corriente de entrada del rectificador es descrita por la forma:

$$i(wt) = WCV_p \cos(wt) + V_p \text{Sen}(wt) \quad [74] \quad (5-1)$$

Esto es la causa por la cual el equipo generador de perturbaciones debe diseñarse para soportar lo que se denomina como el “Inrush Peak”, o pico máximo de irrupción este pico corresponde al valor máximo posible  $I_p = WCV_p$  [7] [8]. En la Figura 5-13 puede apreciarse como al conectarse y/o reconectarse la carga/EUT a voltaje nominal aparece un pico corriente de mayor que el de estado estable.

**Figura 5-13:** Resultados prueba de Hundimiento (SAG/DIP) para carga RC. Muchos Ciclos completos.

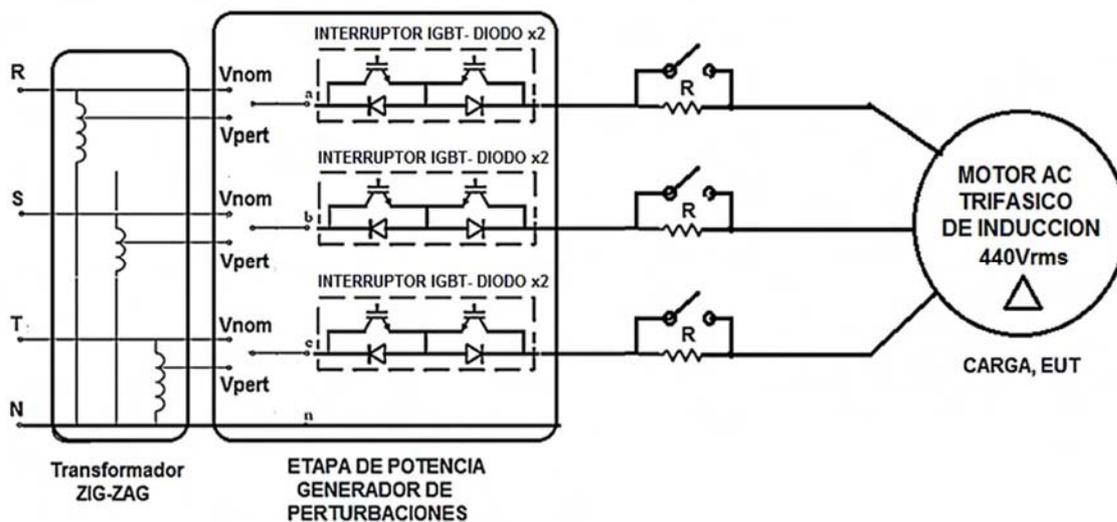


### 5.2.3 Pruebas de funcionamiento con carga RL (Motor AC)

Para probar el funcionamiento del generador de perturbaciones con carga de tipo Inductivo (RL) se utilizó un motor de inducción trifásico ABB de 220Vrms/440Vrms, 10HP, referencia M2QA132S2B, con los devanados conectados en configuración Delta. Para probar un Hundimiento de tensión con carga RL se ha conectado el equipo de acuerdo al esquema de la Figura 5-14, es importante notar que mediante la conexión de los taps de los seis secundarios (dos por fase) del transformador zig-zag se pueden producir hundimientos simétricos y asimétricos con o sin desbalance.

Entendiéndose como voltajes desbalanceados los voltaje fase que no solo tienen un cambio en su valor de amplitud respecto al voltaje nominal, si no que adicionalmente tienen una variación de su fase [8].

**Figura 5-14:** Circuito de prueba con carga RL (Motor AC) para el Generador trifásico de perturbaciones de tensión.



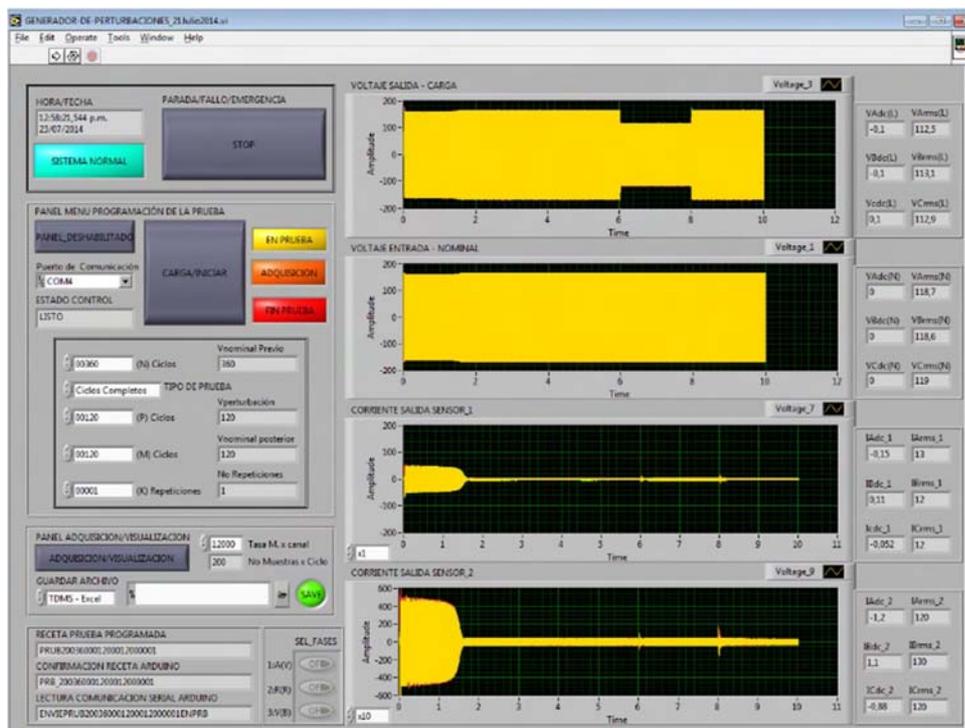
En la Figura 5-14 se puede observar que para la protección del equipo se ha colocado antes del motor AC trifásico una resistencia de  $1,4\Omega$  por cada fase, la cual se utiliza como elemento de arranque, puesto que al alimentar el motor con el voltaje nominal previo a la perturbación se debe limitar la corriente inicial, luego de que el motor ha adquirido estado estable (2-4 Segundos) estas resistencias se cortocircuitan con un interruptor trifásico.

## Hundimiento de tensión trifásico simétrico

Para probar un hundimiento simétrico de las tres fases se conecta el generador de perturbaciones de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 5-14, los taps del transformador se conectan para producir un hundimiento de tensión con amplitud de 70% para cada fase, el motor trifásico de inducción como carga/EUT. Es de recordar que el propósito de esta prueba es didáctico dado que según la normatividad esta prueba no es aceptable en una prueba de inmunidad [8].

En la Figura 5-15 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 360 ciclos (6 segundos) para  $V_{nom\_anterior}$ , 120 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 120 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , y 1 repetición. Nótese el alto valor de la corriente en el arranque del motor AC, aunque está limitada por las resistencias de  $1,4\Omega$ , estas resistencias se desconectan de forma manual a los 3-4 segundos una vez el motor adquiere estado estable.

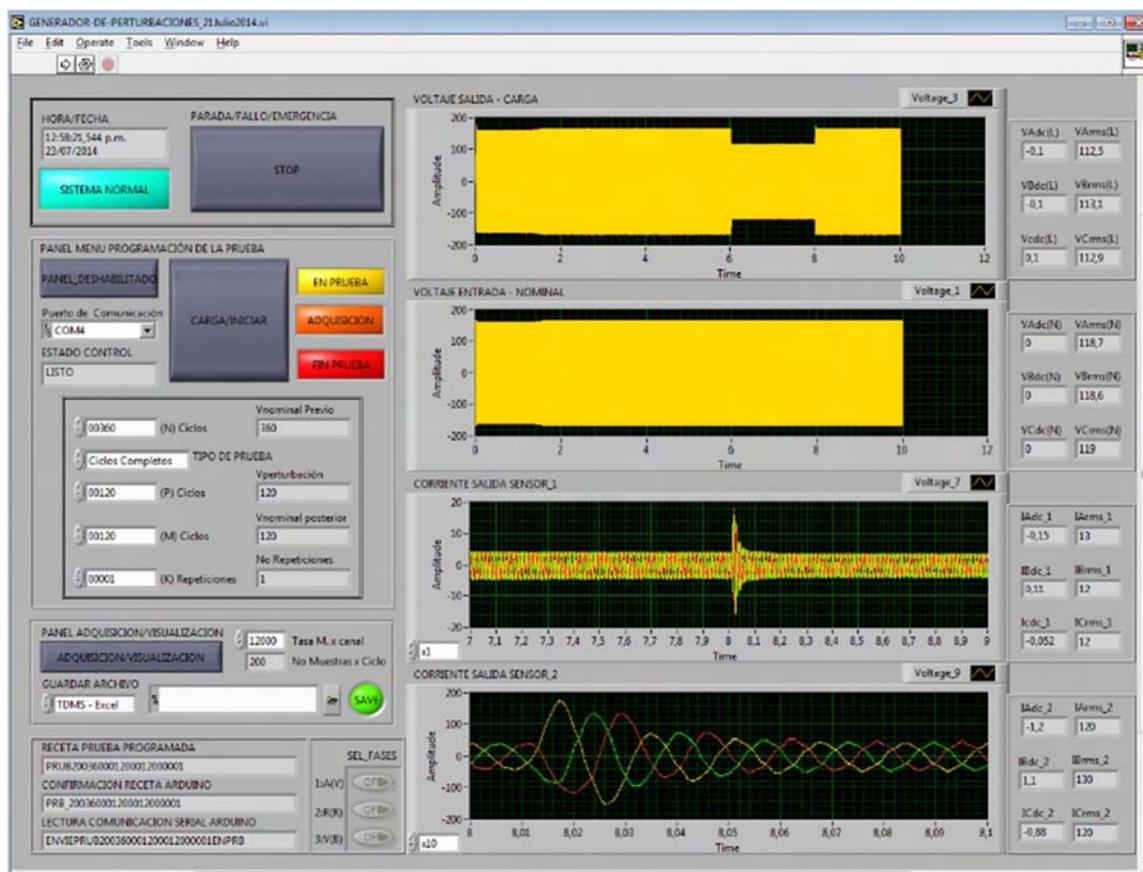
**Figura 5-15:** Resultados prueba de Hundimiento Simétrico (SAG/DIP) para carga RL. Muchos Ciclos completos.



Nótese como se puede observar con claridad el hundimiento de tensión y su relación con la forma de onda de la corriente en la carga, es importante destacar los incrementos de la corriente iniciar y finalizar el hundimiento de la tensión.

Para poder visualizar mejor los resultados gráficos se puede aprovechar la funcionalidad de los graficadores de labview usados, haciendo click con el mouse en los ejes del graficador se puede ajustar los límites mínimos y máximos. Tal como se muestra en la Figura 5-16, en donde se han ajustado los límites en el graficador del sensor de corriente 2, esto para poder visualizar con claridad el incremento de corriente ocurrido a los 8 segundos de prueba, en el punto donde el voltaje nominal es re-conectado a la carga/EUT (motor trifásico AC de inducción). Comparando las formas de la corriente para cada fase se puede ver que tienen amplitudes diferentes en el evento, que luego de vuelven iguales al adquirir el estado estable, esto es efecto del control por cruce por cero.

**Figura 5-16:** Resultados prueba de Hundimiento Simétrico (SAG/DIP) para carga RL. Muchos Ciclos completos.

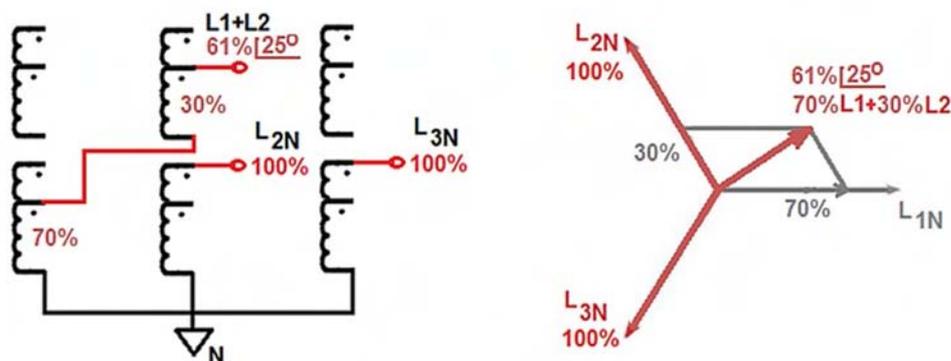


## Hundimiento de tensión Asimétrico desbalanceado, Tipo 1 [8]

Según la norma IEC 61000-4-34 [8] es aceptable en sistemas trifásicos los hundimientos asimétricos que tengan desbalance, esto es porque los casos reales de fallos en la red de distribución de energía se comportan de esta manera [14].

Para probar un hundimiento Asimétrico con desbalance en una fase se conecta el generador de perturbaciones de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 5-14, con el motor trifásico de inducción como carga/EUT. Adicionalmente, los taps del transformador se conectan de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 6-17, esto para producir un hundimiento de tensión con amplitud de 61% y desbalance de  $25^\circ$  para una de las fases (conformada por la suma fasorial:  $70\%L_1+30\%L_2$ ), mientras que las otras dos fases son conectadas a los taps de 100%.

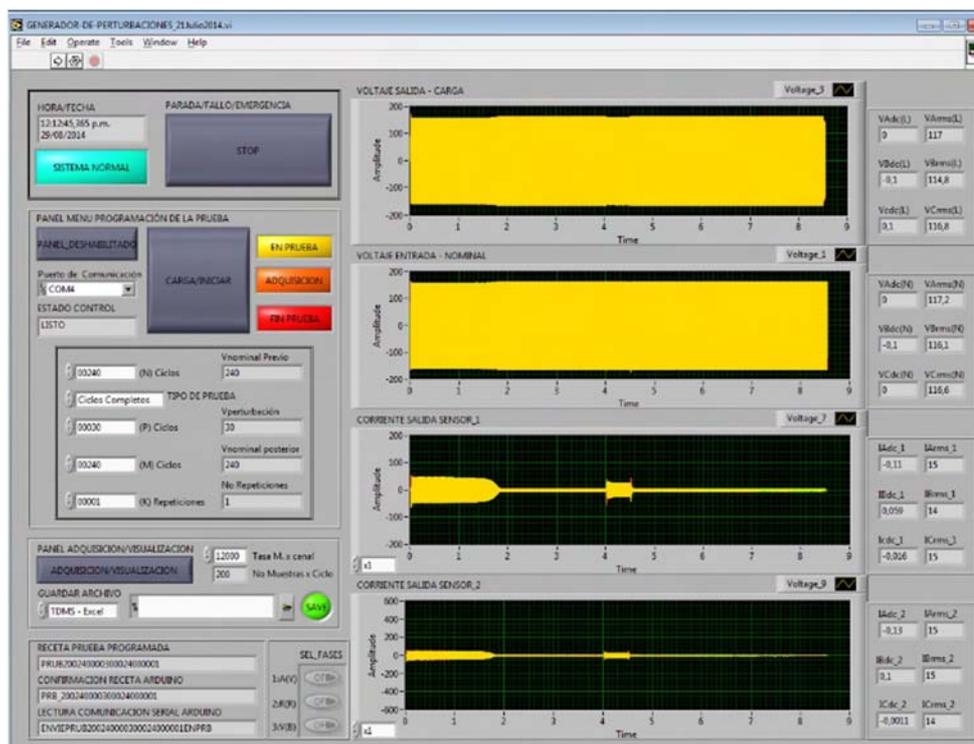
**Figura 5-17:** Conexión de los devanados secundarios del transformador zig-zag para generar un hundimiento de tensión asimétrico desbalanceado en una fase.



En la Figura 5-18 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 240 ciclos (6 segundos) para  $V_{nom\_anterior}$ , 30 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 240 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , y 1 repetición. Nótese el alto valor de la corriente en el arranque del motor AC, y el incremento de la corriente en el momento en que ocurre la perturbación. En esta oportunidad se ha decidido no usar la funcionalidad de labview para modificar las escalas de los graficadores, y con esto poder visualizar de mejor manera los voltajes y corrientes en el momento de la perturbación, en vez de esto y por razones didácticas se ha decidido presentar esta información a partir del archivo

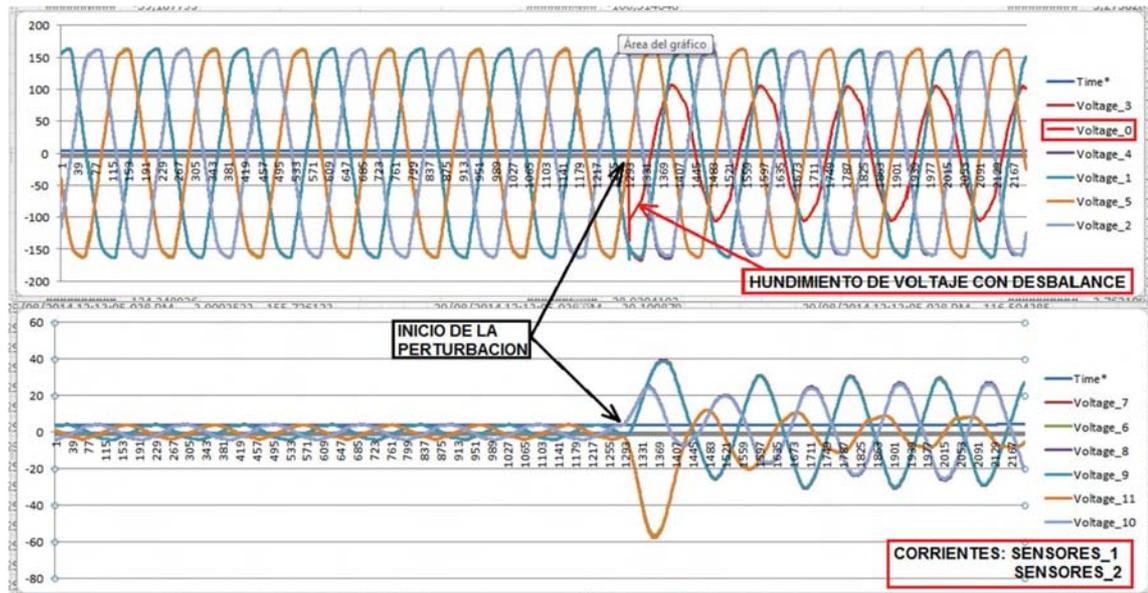
(.tdms) en Excel producto del registro de datos de la prueba, como un ejemplo de la funcionalidad del equipo.

**Figura 5-18:** Resultados prueba de Hundimiento Asimétrico Desbalanceado en una fase para carga RL. Muchos Ciclos completos.



En la Figura 5-19 se presentan los resultados de la prueba, específicamente de los voltajes y corrientes a partir del registro de datos en archivo .tdms, compatible con Excel, en donde puede apreciarse que solo se han graficado los datos correspondientes al momento en el cual ocurre el evento. Como se describió anteriormente la perturbación es un hundimiento asimétrico desbalanceado de amplitud 61%, y fase  $25^\circ$ , en una sola fase. Nótese que en la gráfica obtenida con Excel de los voltajes nominales y en la carga, se puede apreciar claramente el cambio de la tensión en la carga (en la fase escogida: Voltaje\_0) en el momento de la perturbación y un sobrepico de tensión producto de esta transición. Adicionalmente, en la gráfica de corrientes se puede apreciar que los valores leídos por los sensores 1 y 2 son casi idénticos a pesar que sus rangos y sensibilidad son diferentes. En el momento del inicio de la perturbación puede apreciarse como hay un incremento asimétrico de la corriente en las tres fases.

**Figura 5-19:** Resultados gráficos del archivo Excel (.tdms), prueba de Hundimiento Asimétrico Desbalanceado en una fase: 61%, 25°, carga RL (motor AC trifásico).



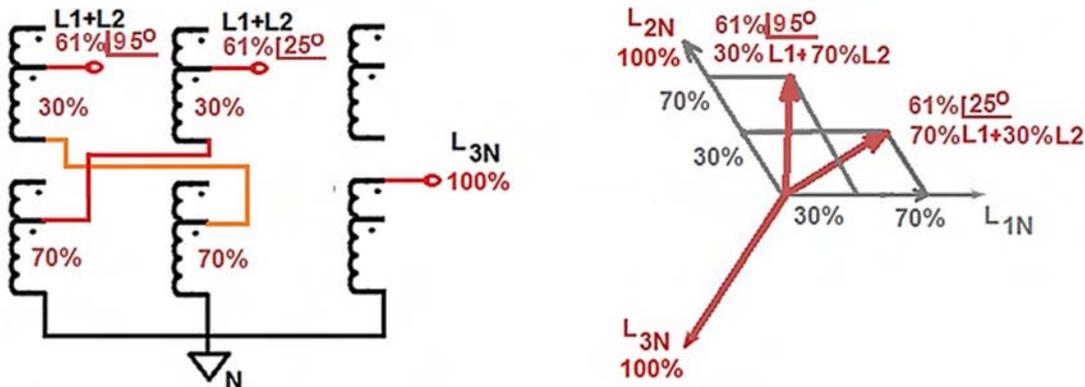
### Hundimiento de tensión Asimétrico desbalanceado, Tipo 2 [8]

Según la norma IEC 61000-4-34 [8] solo son aceptables los hundimientos asimétricos que tengan desbalance en sistemas trifásicos, esto es porque los casos reales de fallos en la red de distribución de energía se comportan de esta manera [14].

Para probar un hundimiento Asimétrico con desbalance en dos fases se conecta el generador de perturbaciones de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 5-14, con el motor trifásico de inducción como carga/EUT.

Adicionalmente, los taps del transformador se conectan de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 5-20, esto para producir un hundimiento de tensión con amplitud de 61% y desbalance de 25° para dos de las fases. Los voltajes de estas fases estarán conformadas por la sumas fasoriales:  $70\%L1+30\%L2$ , y  $30\%L1+70\%L2$ , mientras que la otra fase L3 está conectada al tap de 100%.

**Figura 5-20:** Conexión de los devanados secundarios del transformador zig-zag para generar un hundimiento de tensión asimétrico desbalanceado en dos fases.

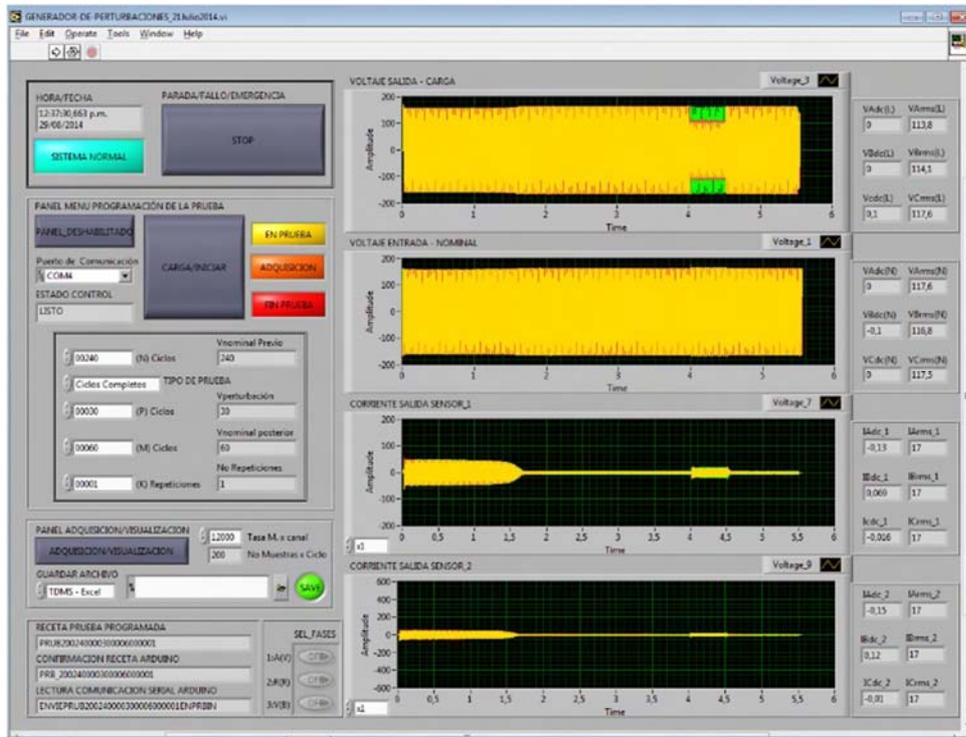


En las Figuras 5-21 y 5-22 se pueden observar los resultados gráficos de los voltajes y corrientes para la secuencia de prueba: 240 ciclos (6 segundos) para  $V_{nom\_anterior}$ , 30 ciclos para  $V_{perturbación}$ , 60 ciclos para  $V_{nom\_posterior}$ , y 1 repetición.

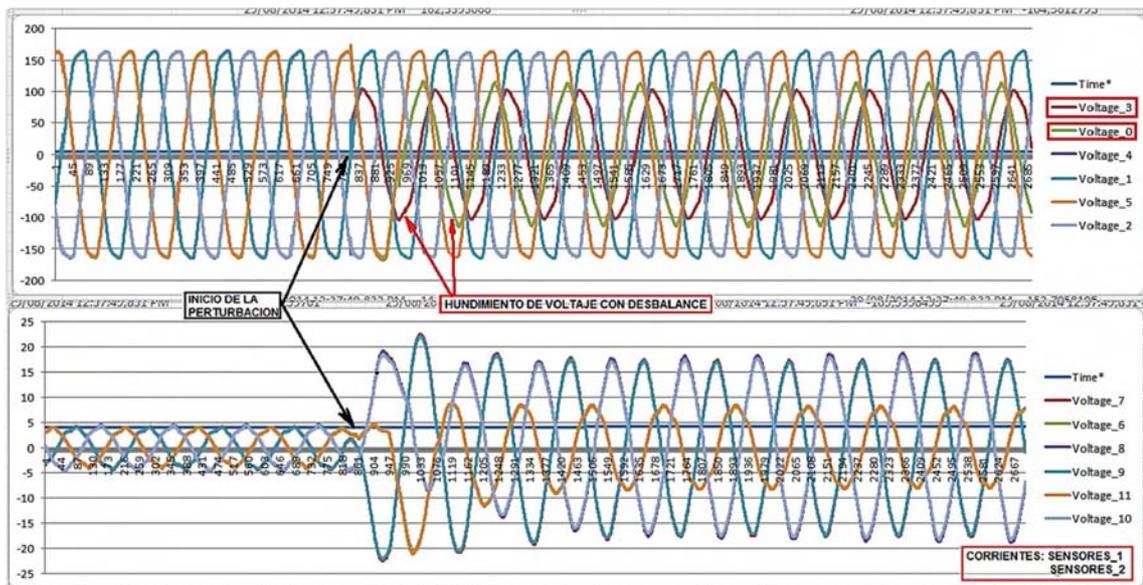
Nótese el alto valor de la corriente en el arranque del motor AC, y el incremento de la corriente en el momento en que ocurre la perturbación. Para visualizar con detalle el evento también se ha decidido no usar la funcionalidad de labview para modificar las escalas de los graficadores de los voltajes y corrientes en la interfaz HMI-GUI, nuevamente por razones didácticas se ha decidido presentar esta información a partir del archivo (.tdms) en Excel producto del registro de datos de la prueba, como un ejemplo de la funcionalidad del equipo.

Como se describió anteriormente la perturbación es un hundimiento asimétrico desbalanceado de amplitud 61%, y ocurrencia en dos fases con ángulos  $25^\circ$  y  $95^\circ$  respecto la referencia. Nótese que en la gráfica obtenida con Excel de los voltajes nominales y en la carga, se puede apreciar claramente el cambio de la tensión en la carga (en las fases escogidas: Voltaje\_0 y Voltaje\_3) en el momento de la perturbación. Adicionalmente, en la gráfica de corrientes se puede apreciar que los valores leídos por los sensores 1 y 2 son casi idénticos a pesar que sus rangos y sensibilidad son diferentes. En el momento del inicio de la perturbación puede apreciarse como hay un incremento transitorio asimétrico de la corriente en las tres fases y como estas se estabilizan como respuesta al funcionamiento del motor en un sistema desbalanceado.

**Figura 5-21:** Resultados prueba de Hundimiento Asimétrico Desbalanceado en dos fases para carga RL. Muchos Ciclos completos.



**Figura 5-22:** Resultados gráficos del archivo Excel (.tdms), prueba de Hundimiento Asimétrico Desbalanceado en dos fases: 61%, 25°/95°, carga RL (motor AC trifásico).



### 5.3 Pruebas de Inmunidad

También se realizó un conjunto de pruebas, destinadas a demostrar que el generador de perturbaciones tiene la capacidad de realizar pruebas completas de inmunidad de equipos. Se entiende como una prueba de inmunidad: el conjunto de pruebas que permiten determinar la respuesta de un equipo, con el fin de determinar si el equipo funciona adecuadamente en un ambiente electromagnético. El estándar de inmunidad IEC-61000-4-1 [19] determina cuatro clasificaciones para el desempeño de cualquier equipo, estas son utilizadas para presentar los resultados o respuesta de un equipo:

- **Operación normal:** Desempeño normal del equipo.
- **Operación defectuosa autorecuperable:** Degradación temporal o pérdida de función en presencia de la perturbación, con auto recuperación. La auto-recuperación se da autónomamente cuando la perturbación desaparece.
- **Operación defectuosa NO-autorecuperable:** Degradación temporal o pérdida de función en presencia de la perturbación, sin auto recuperación. La recuperación no se da autónomamente cuando la perturbación desaparece, requiere de la intervención de un operador o de la reposición del sistema para su recuperación.
- **Fallo/Daño:** Degradación o pérdida de función que no es recuperable, el equipo no es recuperable por los daños producidos durante la perturbación.

Teniendo en cuenta la clasificación de los tipos de respuesta observable que puede tener un equipo, se plantea cuatro niveles para valorar la de inmunidad de un equipo:

- **Inmune:** Cuando el equipo no ve afectado su funcionamiento por la perturbaciones a las que es sometido.
- **Susceptible:** Cuando el equipo sufre una operación defectuosa autorecuperable a alguna de las perturbaciones a la que es sometido.
- **Muy susceptible:** Cuando el equipo sufre una operación defectuosa No-autorecuperable a alguna de las perturbaciones a la que es sometido.
- **Critica:** cuando el equipo no es recuperable, por los daños producidos durante alguna de las perturbaciones.

Los equipos sometidos a prueba de inmunidad fueron:

- Carga monofásica: Bombilla LFC: 25W, E27, 120Vrms, 50-60Hz, Ref: 6400K luz blanca, cantidad de bombillas probadas: 6.
- Carga trifásica: Motor AC trifásico de inducción, ABB de 220Vrms/440Vrms, 10HP, referencia M2QA132S2B, con los devanados conectados en configuración Delta, cantidad de motores probados: 1.

Las pruebas realizadas para determinar la inmunidad de las Bombillas LFC (carga monofásica) se ajustaron a la norma IEC-61000-4-11 [7], Las pruebas realizadas para determinar la inmunidad del Motor AC trifásico (carga trifásica) se ajustaron a la norma IEC-61000-4-34 [8]. Por lo tanto, todas las pruebas aplicadas fueron hundimientos y/o interrupciones de tensión, de magnitudes y duración apropiadas dependiendo del tipo de carga tal como se muestra en la Tabla 5-1.

**Tabla 5-1:** Pruebas de inmunidad realizadas según el tipo de carga.

TIPO DE CARGA	TIPO DE PERTURBACION	MAGNITUD	DURACION [Ciclos]
<b>BOMBILLAS LFC (MONOFÁSICA)</b>	HUNDIMIENTO	100% (Referencia: No perturbación)	1, 12, 30, 300, 3600
		90%	½, 1, 12, 30, 300, 3600
		80%	½, 1, 12, 30, 300, 3600
		70%	½, 1, 12, 30, 300, 3600
		40%	½, 1, 12, 30, 300, 3600
	INTERRUPCIÓN	0%	½, 1, 12, 30, 300, 3600
<b>MOTOR AC de INDUCCIÓN (TRIFÁSICO)</b>	HUNDIMIENTO SIMETRICO	80%	12, 30, 300
		70%	12, 30, 300
		40%	12, 30, 300
	HUNDIMIENTO ASIMETRICO CON DESBALANCE (TIPO 1)	72%	12, 30, 300
		61%	12, 30, 300
		53%	12, 30, 300
	HUNDIMIENTO ASIMETRICO CON DESBALANCE (TIPO 2)	85%	12, 30, 300
		79%	12, 30, 300
		61%	12, 30, 300

Para probar las cargas LFC (6 bombillas) estas se han conectado al generador de perturbaciones de acuerdo al esquema de la Figura 5-1, en donde se utiliza como carga/EUT un arreglo paralelo de dos bombillas LFC por cada fase. En la Figura 5-23 se puede observar el montaje físico de las cargas y la conexión de los taps del transformador para producir el hundimiento de tensión deseado durante una prueba.

**Figura 5-23:** Montaje de prueba con cargas LFC.



Como se mencionó anteriormente, se realizaron todas las pruebas consignadas en la Tabla 5-1, en las cuales se pudo apreciar fenómenos cualitativos a simple vista, tales como: parpadeos de duración corta, moderada, y larga, también se pudieron apreciar disminuciones de la intensidad luminosa a diferentes niveles, y finalmente para lagunas perturbaciones muy fuertes las bombillas se apagan completamente. Es importante aclarar que en algunas pruebas no todas las bombillas respondieron de la misma forma a la perturbación, y que todas estas observaciones cualitativas fueron registradas para su posterior comparación con el análisis de datos.

Teniendo en cuenta los criterios para analizar la respuesta de un equipo, y su valoración en los niveles de inmunidad planteados se tiene que:

- **Operación normal:** Desempeño normal la luminaria LFC, ilumina con intensidad igual en presencia de la perturbación.
- **Operación defectuosa autorecuperable:** La luminaria LFC presenta parpadeo o disminución de la intensidad, pero al desaparecer la perturbación esta recupera su desempeño normal.
- **Operación defectuosa NO-autorecuperable:** La luminaria LFC presenta parpadeo o disminución de la intensidad, pero al desaparecer la perturbación esta no recupera su desempeño normal, requiere restablecimiento.
- **Fallo:** La luminaria LFC, nunca recupera su estado normal o sufre daño total y no ilumina de forma permanente.

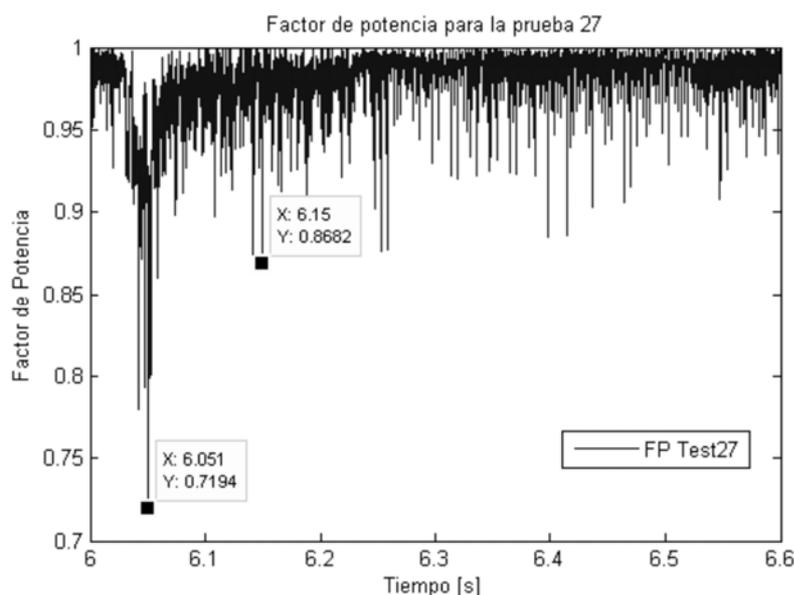
La información de las pruebas para bombillas LFC fue almacenada en los archivos de registro .tdms, y para su procesamiento se tuvieron en cuenta los criterios suministrados por el Ing. Andrés Pavas Martínez:

1. Se deben identificar al menos 12 ciclos completos antes del hundimiento, 12 ciclos posteriores y los ciclos que correspondan al hundimiento.
2. Para las señales obtenidas se deberá realizar los siguientes cálculos: Hallar los valores eficaces de tensión y corriente  $U$  e  $I$  para cada ciclo. Los ciclos se deben definir con respecto a los cruces por cero de la tensión.
3. Para las señales obtenidas se deberá realizar los siguientes cálculos: Potencia aparente ( $S = UI$ ), potencia activa ( $P = \langle U, I \rangle$ ), factor de potencia ( $FP = P/S$ ) y potencia no-activa ( $\sqrt{S^2 - P^2}$ ) para cada ciclo, a partir de los datos de tensión y corriente en el dominio del tiempo.

El procesamiento de esta información y su valoración en función de los datos recopilados fue realizado como ejercicio en el curso de calidad de energía del Ingeniero Andrés Pavas, por los estudiantes Carlos Rojas y William Villamil, a quienes se les facilitó los archivos .tdms de los datos registrados de las pruebas. Posteriormente esta información fue cruzada con la obtenida en el momento de las pruebas para determinar la

característica de inmunidad del conjunto de bombillas. Un aporte importante del proceso de análisis de datos de los resultados, es la forma como es posible identificar numéricamente los estados de operación defectuosa. Por ejemplo, en el análisis de factor de potencia de la prueba Test#27 correspondiente a un hundimiento con magnitud 40% y duración 30 ciclos, el factor de potencia a voltaje nominal se mantiene entre 0,9 y 1. Pero al iniciar el hundimiento de tensión este se degrada bastante, llegando a disminuir hasta 0,72 tal como se puede apreciar en la Figura 5-24, esto implica que durante la perturbación la carga tuvo que tener una operación defectuosa. Finalmente al terminar la perturbación y alimentar la carga de nuevo con voltaje nominal puede apreciarse como el factor de potencia vuelve a estar entre los límites adecuados.

**Figura 5-24:** Resultados prueba de inmunidad Bombillas LFC: análisis factor de potencia prueba Test#27. (Imagen tomada de los resultados del análisis de los datos de las pruebas, en el desarrollo del curso de calidad de energía 2014-03, Docente: Ing Andrés Pavas Martínez) [75] [76] [77]



En la Tabla 5-2 se presentan los resultados finales del análisis de datos de las pruebas de inmunidad para las bombillas LFC y su comparación con los resultados cualitativos percibidos durante la prueba. Se puede ver que las bombillas LFC no son inmunes a los hundimientos de tensión, pero tampoco sufren daños irreparables. En la valoración según los niveles de inmunidad se puede concluir que esta carga es “**Susceptible**”.

**Tabla 5-2:** Valoración de los Resultados, prueba de inmunidad para Bombillas LFC.

U <sub>res</sub> [%]	Duración [ciclos]					
	1/2	1	12	30	300	3600
90	I	I	S	S	S	S
80	S	S	S	S	S	S
70	S	S	S	S	S	S
40	S	S	S	S	S	S
0	S	S	S	S	S	S

I: Inmune, S: susceptible, MS: Muy susceptible, C: Crítica.

Para probar el Motor AC trifásico de inducción, marca: ABB, 220Vrms/440Vrms, 10HP, referencia M2QA132S2B, este se ha conectado al generador de perturbaciones de acuerdo al esquema de la 5-14 y se conectan internamente los devanados del motor en configuración Delta. En la Figura 5-25 se puede observar el montaje físico del motor con las resistencias limitadoras de corriente (reóstatos 1,4Ω) para amortiguar la corriente en el arranque.

**Figura 5-25:** Montaje de prueba con carga trifásica: Motor AC trifásico de inducción.

Como se mencionó anteriormente, para el motor AC se realizaron todas las pruebas consignadas en la Tabla 5-1, en las cuales se pudo apreciar fenómenos cualitativos, tales como: disminución en la velocidad de rotación del motor, vibraciones, y emisión de sonido relacionados con el brusco cambio de velocidad en el eje del motor. Todas estas observaciones cualitativas fueron registradas para su posterior comparación con el análisis de datos. Teniendo en cuenta los criterios para analizar la respuesta de un equipo, y su valoración en los niveles de inmunidad planteados se tiene que:

- **Operación normal:** Desempeño normal del motor AC, velocidad nominal.
- **Operación defectuosa autorecuperable:** El motor AC presenta una disminución de la velocidad, vibraciones y/o emisión de ruido audible, solo durante la perturbación.
- **Operación defectuosa NO-autorecuperable:** El motor AC presenta una disminución de la velocidad, vibraciones y/o emisión de ruido audible, pero al desaparecer la perturbación esta no recupera su desempeño normal, y requiere restablecimiento.
- **Fallo:** El motor AC nunca recupera su estado normal o sufre daño total, y ya no gira de forma permanente.

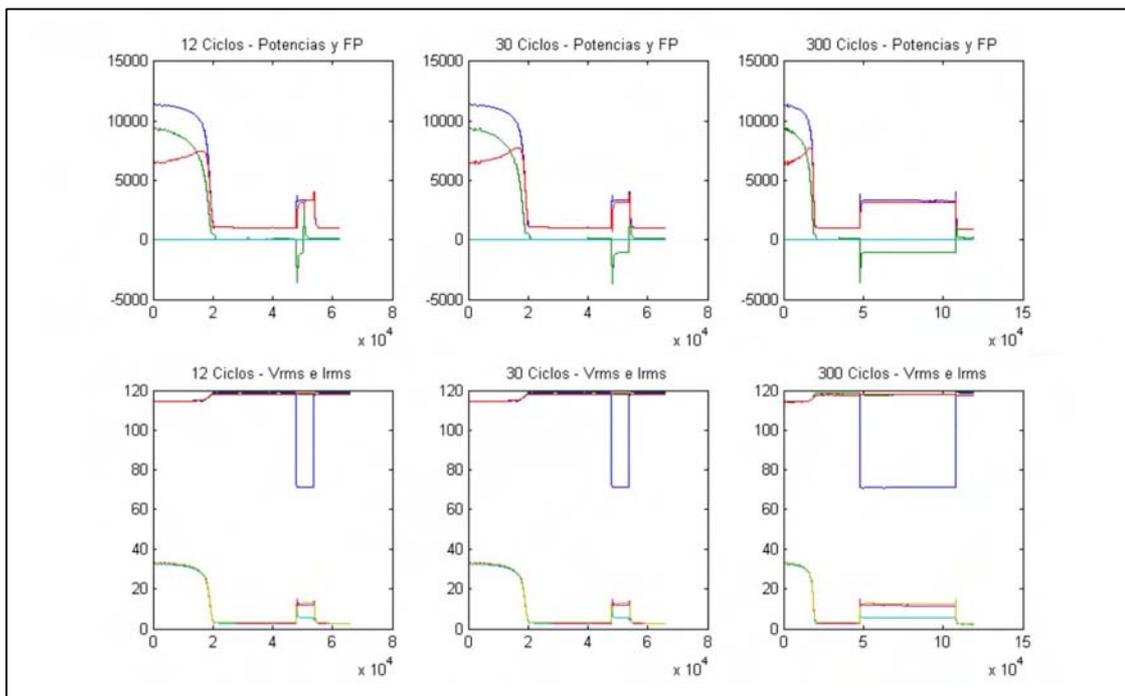
La información de las pruebas para bombillas LFC fue almacenada en los archivos de registro .tdms, y para su procesamiento se tuvieron en cuenta los criterios suministrados por el Ing. Andrés Pavas Martínez:

1. Se deben identificar al menos 12 ciclos completos antes del hundimiento, 12 ciclos posteriores y los ciclos que correspondan al hundimiento.
2. Para las señales obtenidas se deberá realizar los siguientes cálculos: Hallar los valores eficaces de tensión y corriente  $U$  e  $I$  para cada ciclo. Los ciclos se deben definir con respecto a los cruces por cero de la tensión.
3. Para las señales obtenidas se deberá realizar los siguientes cálculos: Potencia aparente ( $S = UI$ ), potencia activa ( $P = \langle U, I \rangle$ ), factor de potencia ( $FP = P/S$ ) y potencia no-activa ( $\sqrt{S^2 - P^2}$ ) para cada ciclo, a partir de los datos de tensión y corriente en el dominio del tiempo.
4. En el caso de cargas trifásicas, se sugiere aplicar el cálculo de cantidades de suma cero, a partir de los cuales se determinaran las potencias: aparente, activa y no-activa.

El procesamiento de esta información y su valoración en función de los datos recopilados fue realizado como ejercicio en el curso de calidad de energía del Ingeniero Andrés Pavas, por los estudiantes Michael Salcedo, Harold Mazo y Daniel Agudelo, a quienes se les facilitó el archivo .tdms con los datos registrados de las pruebas. Posteriormente esta información fue cruzada con la obtenida en el momento de las pruebas para determinar la característica de inmunidad del Motor AC trifásico de inducción.

Un aporte importante del proceso de análisis de datos de los resultados, es la forma como es posible identificar los estados de operación defectuosa, mediante el análisis de las gráficas de los valores RMS, las potencias y el factor de potencia por ciclo. Por ejemplo, en el análisis de las pruebas correspondientes a un hundimiento con magnitud 70% y duraciones de 12 ciclos, 30 ciclos, y 300 ciclos (Test\_4, Test\_5, Test\_6), se han graficado las potencias, el factor de potencia (FP), y los valores RMS por ciclo, tal como se puede apreciar en la Figura 5-26. Se puede apreciar el momento en el que ocurre la perturbación y su afectación sobre el funcionamiento del motor.

**Figura 5-26:** Resultados prueba de inmunidad Motor AC: análisis valores RMS, Potencias y factor de potencia por ciclos. (Imagen tomada de los resultados del análisis de los datos de las pruebas, en el desarrollo del curso de calidad de energía 2014-03, Docente: Ing Andrés Pavas Martínez) [75] [76] [77]



En la Tabla 5-3 se presentan los resultados finales del análisis de datos de las pruebas de inmunidad para el motor AC y su comparación con los resultados cualitativos percibidos durante la prueba. Se puede ver que el motor No es inmune a los hundimientos de tensión, pero tampoco sufren daños irreparables. En la valoración según los niveles de inmunidad se puede concluir que esta carga es “**Susceptible**”.

**Tabla 5-3:** Valoración de los Resultados, prueba de inmunidad para el Motor AC trifásico de inducción. [75] [76] [77]

	<b>U<sub>res</sub></b> <b>[%]</b>	<b>Duración [ciclos]</b>		
		<b>12</b>	<b>30</b>	<b>300</b>
<b>HUNDIMIENTO SIMETRICO</b>	<b>80</b>	I	I	I
	<b>70</b>	S	S	S
	<b>40</b>	S	S	S
<b>HUNDIMIENTO ASIMETRICO CON DESBALANCE (TIPO 1)</b>	<b>72</b>	S	S	S
	<b>61</b>	S	S	S
	<b>53</b>	S	S	S
<b>HUNDIMIENTO ASIMETRICO CON DESBALANCE (TIPO 2)</b>	<b>85</b>	I	I	I
	<b>79</b>	S	S	S
	<b>61</b>	S	S	S

**I:** Inmune, **S:** susceptible, **MS:** Muy susceptible, **C:** Critica.

## RESUMEN CAPITULO

En este capítulo se presenta el protocolo de prueba para el uso seguro del equipo generador de perturbaciones. Se establece el procedimiento para su encendido/energización, la configuración de voltajes de prueba, ingreso de la programación de una prueba, consideraciones para la ejecución de una prueba, consideraciones para la transición segura entre pruebas y la secuencia de apagado del equipo.

Se presentan los resultados de las “pruebas de funcionamiento”, estas fueron escogidas y diseñadas para probar la funcionalidad del equipo. Efectivamente se demuestra que el equipo puede generar perturbaciones monofásicas y trifásicas.

Se demuestra que el generador puede producir perturbaciones/eventos de tensión tales como: hundimientos de tensión e interrupciones de tensión de corta duración, elevaciones de tensión, sobretensiones (elevaciones de larga duración), Subtensiones (hundimientos de larga duración), interrupciones de larga duración, en cumplimiento con las normas revisadas en el capítulo 1. También se demuestra que puede producir fluctuaciones del tipo didáctico puesto que estas no cumplen normatividad.

Adicionalmente, se demuestra que el equipo puede producir hundimientos de tensión trifásicos desbalanceados en una o dos fases, en cumplimiento con la normatividad. Finalmente en el diseño del equipo no se pudo adicionar la capacidad de producir perturbaciones con desfase, es de recordar que esta exigencia en la normatividad es de carácter opcional, y queda como una opción de mejora para trabajos futuros.

En el desarrollo del capítulo se presenta la conexión de diferentes tipos de cargas, y se demuestra que el generador soporta cargas: resistivas (Bombillas incandescentes), electrónicas (Bombillas LFC), cargas RC (circuitos de rectificación y filtrado), y cargas RL (motores AC trifásicos). Mediante la adecuada conexión de las cargas el equipo soporta picos de corriente, distorsiones de la forma de onda y desfase de la corriente.

Se presentan los resultados de las “pruebas de inmunidad”, estas fueron escogidas y diseñadas para probar esta funcionalidad del equipo. Efectivamente se demuestra que con este generador se puede probar la inmunidad de un equipo ante perturbaciones con eventos entre  $\frac{1}{2}$  ciclo y más de 10 minutos de duración, en cumplimiento con los estándares presentados en la Tabla 1-4, excepto para fluctuaciones.

Los equipos EUT, que fueron escogidos para la realización de pruebas de inmunidad son: para pruebas de inmunidad monofásica se escogió un conjunto de bombillas LFC, y para pruebas de inmunidad trifásica se escogió un motor AC de inducción de 10HP. En ambos casos se realizó todo el conjunto de pruebas ante hundimientos e interrupciones requerido por las normas IEC 61000-4-11/34, la información de las pruebas se registró en archivos .tdms, estos fueron procesados posteriormente y se obtuvo el resultado total de las pruebas de inmunidad para cada equipo, estos resultados se encuentran consignados en las Tablas 5-2 y 5-3.

De todo lo anterior se puede concluir que el generador trifásico de perturbaciones de tensión desarrollado en esta Tesis, cumple con el objetivo de proveer un equipo que proporcione la generación de hundimientos e interrupciones sujetas a las normas IEC 61000-4-11/34, ITIC (CBEMA), SEMI F47. Además, que con un poco de ambición, y teniendo en cuenta en el diseño e implementación parámetros de otras normas compatibles, con pequeños cambios se pudo obtener un generador que puede producir una variedad mayor de perturbaciones que las propuestas originalmente, buscando siempre el cumplimiento de los estándares revisados.

## 6. Resultados y Conclusiones

### 6.1 Resultados

En esta Tesis se diseñó, desarrolló e implemento un equipo generador trifásico de perturbaciones de tensión, de diseño modular y operación semiautomática. Construido con un transformador Zig-Zag e interruptores de estado sólido basados en IGBT. Este generador se puso al servicio de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, lo que hace posible la realización de pruebas de perturbaciones de tensión, pruebas de inmunidad y pruebas de envejecimiento de equipos. Este equipo generador soporta la conexión de diferentes tipos de cargas monofásicas y trifásicas, tales como: resistivas, equipos electrónicos, cargas RC (circuitos de rectificación y filtrado, fuentes de alimentación) y cargas RL (motores AC).

El equipo generador construido puede producir las perturbaciones deseadas según el objetivo general y los objetivos específicos de esta Tesis, tales como hundimientos de tensión (SAG/DIP) e interrupciones de corta duración (Outage/Interruption), en cumplimiento de las normas IEC 61000-4-11 [7], IEC 61000-4-34 [8], y en cumplimiento de las pruebas de inmunidad basadas en las curvas SEMI F47 [9] [10] e ITIC (CBEMA) [11]. En cuanto a los hundimientos e interrupciones de tensión el generador también puede producir eventos de larga duración como bajas tensiones e interrupciones sostenidas, en cumplimiento con las normas IEEE 1159 [12], EN 50160 [20]. La duración, y amplitud de los eventos de tensión es configurable de acuerdo a las normas, así como también es configurable la cantidad de repeticiones, esto también permite realizar pruebas de envejecimiento.

A partir de la investigación y comparación de la normatividad existente para perturbaciones en sistemas de energía eléctrica, se propone un listado de normas a

seguir para la realización de pruebas de inmunidad de diferentes tipos de perturbaciones y a su vez se determinaron las especificaciones y criterios de diseño para un generador trifásico de perturbaciones de tensión.

Se desarrolló una interfaz que permite operar el equipo generador y programar las pruebas, así mismo permite visualizar las mediciones de voltajes y corrientes durante la realización de una prueba. El equipo es capaz de almacenar la información de una prueba en diferentes tipos de archivos. A partir de los datos almacenados en un conjunto de pruebas, es posible mediante el procesamiento y visualización posterior determinar la capacidad de inmunidad de un equipo EUT.

En el montaje e integración de todos los módulos del equipo se debe tener en cuenta criterios de compatibilidad electromagnética y seguridad eléctrica. Por esto se necesitó del uso de aislamientos, barrajes, protecciones, apantallamientos, cables blindados, canaletas metálicas, conexiones de masa (Tierra).

## 6.2 Conclusiones

El generador de perturbaciones utilizado en esta Tesis corresponde al **Generador de perturbaciones de tensión basado en transformador por conmutación de taps**, se utilizó como principal criterio de selección el cumplimiento de las especificaciones y criterios de diseño derivados del estudio, análisis y comparación de las normas y pruebas de inmunidad (obligatorios/cumplimiento, opcionales), y de factores adicionales tales como: simplicidad de funcionamiento, versatilidad (capacidad de generar diferentes tipos de perturbaciones monofásicas y trifásicas), Robustez, Costo, y Portabilidad (disposición final: teniendo en cuenta la más apropiada de diseñar e implementar para los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia).

Se encontró que adquirir y registrar las señales, sincronizarse con la red, controlar los interruptores de potencia y supervisar los estados del equipo (alarmas de fallo) no es posible por un solo sistema de control. Esto porque son tareas que requieren procesarse

en paralelo, manejan tiempos de maquina diferente, algunas tareas requieren tiempo real y otras pueden utilizar un buffer, todo esto al mismo tiempo. Por lo anterior el sistema de control se subdividió jerárquicamente en dos niveles: el primer nivel es constituido por un módulo de gestión, que incluye la interfaz GUI-HMI para la programación de las pruebas y el registro de datos de las mismas, es soportado en un PC y software labview. El segundo nivel está constituido por un módulo microcontrolado que se encarga de la sincronización y control de los interruptores IGBT, y la revisión de los estados del equipo (alarmas de fallo) soportado en Arduino ONE. Se demostró que la gran ventaja del empleo de esta arquitectura es la distribución de las tareas.

Se encontró que el generador de perturbaciones de tensión está limitado en su uso por la corriente de fuga AC de los interruptores bidireccionales de potencia. Esto es porque en el momento de su diseño se requirió proteger los dispositivos IGBT contra sobretensiones usando snubbers, y como resultado de la capacitancia introducida por el snubber se tiene una pequeña corriente de fuga AC. Esta corriente afecta cargas de muy bajo consumo de potencia, tales como las bombillas LFC. Esto determina que el diseño de los interruptores bidireccionales IGBT-Diodo para equipos de pequeñas y de grandes potencias no es igual.

### 6.3 Contribuciones

Un logro importante es que este equipó generador trifásico de perturbaciones de tensión es el primero en sus características en el país, esto permitirá apoyar la docencia en calidad de la energía y compatibilidad electromagnética, y al mismo tiempo proyectos de investigación y de extensión.

El diseño y configuración del equipo construido no solo permite la generación de hundimientos e interrupciones de tensión, sino que también permite producir perturbaciones adicionales tales como: elevaciones de tensión (Swell), sobretensiones (Overvoltage), en cumplimiento de las normas IEEE 1159 [12], EN 50160 [20], IEC 61000-4-30 [23] y en cumplimiento de las pruebas de inmunidad basadas en las curvas ITIC, CBEMA [11], para perturbaciones con duración mayor igual a 0,5 ciclos y amplitud menor igual a 200%. Se excluyen los eventos transitorios.

El equipo generador construido también permite producir fluctuaciones de tensión, esto sin un cumplimiento completo de las normas IEC 61000-3-3 [18], IEC 61000-3-11 [22], IEC 61000-4-14 [24], IEC 61000-4-15 [13], lo cual significa que puede producir fluctuaciones de tensión solo con fines didácticos y educativos. Esto es porque no es posible producir fluctuaciones con variaciones de la tensión  $\pm\Delta V$  menores a 5% y 10%.

A partir de la investigación y comparación de la normatividad existente para perturbaciones en sistemas de energía eléctrica, se propone un listado de normas a seguir para el diseño de pruebas de inmunidad.

La Universidad Nacional de Colombia obtiene con este equipo y la experiencia de su desarrollo, la oportunidad de convertirse en un laboratorio de referencia para pruebas de inmunidad en calidad de potencia.

## 6.4 Costos

A continuación se presentan costos relacionados con el desarrollo y construcción del generador trifásico de hundimientos e interrupciones:

**Tabla 6-1:** Costos Generador Trifásico de Tension AC.

	<b>COSTO</b>	<b>OBSERVACIONES: Fuente de Financiación</b>
<b>Transformador Zig-Zag:</b>	\$10'000.000	Donación grupo EM&D
<b>Hardware Generador:</b> Materiales, Componentes, módulos, PC, tarjetas, etc...	\$25'000.000	Semilleros Posgrado DIB-UNAL, aporte: 10'000.000 Aporte Estudiante: 15'000.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$35'000.000 Pesos</b>	

Un logro importante del desarrollo de este equipó generador trifásico de perturbaciones de tensión es su bajo costo comparativo con un generador comercial de prestaciones similares. Por ejemplo, en el año 2012 se cotizo un generador de hundimientos que puesto en Bogotá costaba \$107.800 USD (Aproximadamente \$220'000.000 Pesos).

## 6.5 Recomendaciones y trabajo futuro

El sistema de control se subdividió jerárquicamente en dos niveles: El primer nivel un PC para interfaz GUI-HMI, el registro y la visualización, y el segundo nivel utiliza una tarjeta microcontrolada para las tareas en tiempo real. La forma de resolver las dificultades del control y su arquitectura están abiertas a discusión y pueden desarrollarse como trabajo futuro, en el sentido que el equipo puede ofrecer una plataforma o medio para explorar otras alternativas.

Las normas y estándares revisados determinan que la realización de pruebas con perturbaciones a diferentes ángulos de fase es de carácter opcional, se propone como trabajo futuro la mejora de esta funcionalidad. Para ello se debe analizar la viabilidad de la implementación de un módulo adicional, porque el módulo de control microcontrolado con Arduino ONE y su sistema de sincronismo no pueden soportar un funcionamiento desfasado. A su vez se debería modificar la interfaz GUI-HMI para que pueda programarse la opción de desfase y su valor.

Como trabajo futuro se propone el desarrollo de un módulo adicional o paquete de software que evalúe los resultados de un conjunto de pruebas, y entregue el reporte de la inmunidad de un equipo EUT.

El desarrollo del generador de perturbaciones de tensión puso en evidencia los requerimientos necesarios para probar cargas de muy bajo consumo, lo cual se propone como trabajo futuro.



# A. Anexo: Calculo de los voltajes de los taps del transformador Zig-Zag

- Norma IEC 61000-4-34

La Norma IEC 61000-4-34, expone los valores de la magnitud de los vectores de los voltajes en las fases para poder obtener los hundimientos de tensión tipo C1, C2, C3. Estos cálculos se realizaron de acuerdo a la formulación en la norma. [8]

**Tabla A-1:** C1: Prueba para hundimiento de tensión Sag/Dip fase-neutro, aceptable, método 1.

IEC 61000-4-34												
TESTING AND MEASUREMENT TECHNIQUES-VOLTAGE DIPS, SHORT INTERRUPTIONS AND VOLTAGE VARIATIONS IN IMMUNITY TESTS FOR EQUIPMENT WITH INPUT CURRENT MORE THAN 16A PER PHASE												
PRUEBA C1: PHASE-NEUTRAL DIP VECTOR												
VECTOR VALUES PER PHASE TO NEUTRAL DIPS: FOR 120V PER PHASE-NEUTRAL												
SAG PHASE-NEUTRAL	PHASE-PHASE VOLTAGE: UL1-L2		PHASE-PHASE VOLTAGE: UL2-L3		PHASE-PHASE VOLTAGE: UL3-L1		PHASE-NEUTRAL: UL1-N		PHASE-NEUTRAL: UL2-N		PHASE-NEUTRAL: UL3-N	
	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE
100% NO SAG	100% 120Vrms	150°	100% 120Vrms	270°	100% 120Vrms	30°	100% 120Vrms	0°	100% 120Vrms	120°	100% 120Vrms	240°
80% L1-N	90% 0.9*120*√3	146°	100% 120*√3	270°	90% 0.9*120*√3	34°	96	0°	100% 120	120°	100% 120	240°
70% L1-N	85% 0.85*120*√3	144°	100% 120*√3	270°	85% 0.85*120*√3	36°	84	0°	100% 120	120°	100% 120	240°
40% L1-N	72% 0.72*120*√3	136°	100% 120*√3	270°	72% 0.72*120*√3	44°	48	0°	100% 120	120°	100% 120	240°
80% L2-N	90% 0.9*120*√3	154°	90% 0.9*120*√3	266°	100% 120*√3	30°	100% 120	0°	96	120°	100% 120	240°
70% L2-N	85% 0.85*120*√3	156°	85% 0.85*120*√3	264°	100% 120*√3	30°	100% 120	0°	84	120°	100% 120	240°
40% L2-N	72% 0.72*120*√3	164°	72% 0.72*120*√3	256°	100% 120*√3	30°	100% 120	0°	48	120°	100% 120	240°
80% L1-N	100% 120*√3	150°	90% 0.9*120*√3	274°	90% 0.9*120*√3	26°	100% 120	0°	100% 120	120°	96	240°
70% L1-N	100% 120*√3	150°	85% 0.85*120*√3	276°	85% 0.85*120*√3	24°	100% 120	0°	100% 120	120°	84	240°
40% L1-N	100% 120*√3	150°	72% 0.72*120*√3	284°	72% 0.72*120*√3	16°	100% 120	0°	100% 120	120°	48	240°

**Tabla A-2: C2: Prueba hundimiento de tensión Sag/Dip fase-fase, aceptable, método 1.**

IEC 61000-4-34 TESTING AND MEASUREMENT TECHNIQUES-VOLTAGE DIPS, SHORT INTERRUPTIONS AND VOLTAGE VARIATIONS IMMUNITY TESTS FOR EQUIPMENT WITH INPUT CURRENT MORE THAN 16A PER PHASE												
PRUEBA C2: PHASE-PHASE DIP VECTOR SAG ONLY PHASE-NEUTRAL WITH SHIFT PHASE ANGLE												
VECTOR VALUES PHASE TO NEUTRAL DIPS: FOR 120V PER PHASE-NEUTRAL												
PHASE-PHASE VOLTAGE:						VOLTAGES PHASE-NEUTRAL OBTAIN						
SAG PHASE-PHASE	PHASE-PHASE VOLTAGE: UL1-L2		PHASE-PHASE VOLTAGE: UL2-L3		PHASE-PHASE VOLTAGE: UL3-L1		PHASE-NEUTRAL: UL1-N		PHASE-NEUTRAL: UL2-N		PHASE-NEUTRAL: UL3-N	
	P% DEPTH	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR
100% NO SAG	100% 120V3 Vrms	150	100% 120V3 Vrms	270°	100% 120V3 Vrms	30°	100% 120Vrms	0°	100% 120Vrms	120°	100% 120Vrms	240°
80% L1-L2	80% 0.8*120°V3	150°	100% 120°V3	270°	92% 0.92*120°V3	41°	72% 86,4	14	100% 120	120°	100% 120	240°
70% L1-L2	70% 0.7*120°V3	150°	100% 120°V3	270°	89% 0.89*120°V3	47°	61% 73,2	25	100% 120	120°	100% 120	240°
40% L1-L2	40% 0.4*120°V3	150°	100% 120°V3	270°	87% 0.87*120°V3	67°	53% 63,6	79	100% 120	120°	100% 120	240°

VOLTAGES PHASE-NEUTRAL OBTAIN												
SAG PHASE-PHASE	PHASE-PHASE VOLTAGE: UL1-L2		PHASE-PHASE VOLTAGE: UL2-L3		PHASE-PHASE VOLTAGE: UL3-L1		PHASE-NEUTRAL: UL1-N		PHASE-NEUTRAL: UL2-N		PHASE-NEUTRAL: UL3-N	
	P% DEPTH	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR
100% NO SAG	100% 120V3 Vrms	150	100% 120V3 Vrms	270°	100% 120V3 Vrms	30°	100% 120Vrms	0°	100% 120Vrms	120°	100% 120Vrms	240°
80% L2-L3	92% 0.92*120°V3	161	80% 0.8*120°V3	270	100% 120°V3	30°	100% 120	0°	72% 86,4	134	100% 120	240°
70% L2-L3	89% 0.89*120°V3	167	70% 0.7*120°V3	270	100% 120°V3	30°	100% 120	0°	61% 73,2	145	100% 120	240°
40% L2-L3	87% 0.87*120°V3	187	40% 0.4*120°V3	270	100% 120°V3	30°	100% 120	0°	53% 63,6	199	100% 120	240°

VOLTAGES PHASE-NEUTRAL OBTAIN												
SAG PHASE-PHASE	PHASE-PHASE VOLTAGE: UL1-L2		PHASE-PHASE VOLTAGE: UL2-L3		PHASE-PHASE VOLTAGE: UL3-L1		PHASE-NEUTRAL: UL1-N		PHASE-NEUTRAL: UL2-N		PHASE-NEUTRAL: UL3-N	
	P% DEPTH	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR
100% NO SAG	100% 120V3 Vrms	150	100% 120V3 Vrms	270°	100% 120V3 Vrms	30°	100% 120Vrms	0°	100% 120Vrms	120°	100% 120Vrms	240°
80% L3-L1	100% 120°V3	150°	92% 0.92*120°V3	281	80% 0.8*120°V3	30	100% 120	0°	100% 120	120°	72% 86,4	254
70% L3-L1	100% 120°V3	150°	89% 0.89*120°V3	287	70% 0.7*120°V3	30	100% 120	0°	100% 120	120°	61% 73,2	265
40% L3-L1	100% 120°V3	150°	87% 0.87*120°V3	307	40% 0.4*120°V3	30	100% 120	0°	100% 120	120°	53% 63,6	319

**Tabla A-3: Voltajes requeridos en los taps del transformador, por cada fase:**

ADDING PHASE+PHASE FOR PHASE-NEUTRAL SHIFT WITH PHASE %L1 + %L2				
SAG PHASE-PHASE	%L1		%L2	
P% DEPTH	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE
80%	80%		20%	
L1-L2	95,9	0	24,1	120
70%	70%		30%	
L1-L2	84,2	0	35,7	120
40%	40%		60%	
L1-L2	48,2	0	72,1	120

**Tabla A-4:** C3: Prueba hundimiento de tensión Sag/Dip fase-fase, aceptable, método 2.

IEC 61000-4-34 TESTING AND MEASUREMENT TECHNIQUES-VOLTAGE DIPS, SHORT INTERRUPTIONS AND VOLTAGE VARIATIONS IN IMMUNITY TESTS FOR EQUIPMENT WITH INPUT CURRENT MORE THAN 16A PER PHASE												
PRUEBA C3: TWO PHASE-PHASE DIP VECTOR TWO SAG PHASE-NEUTRAL WITH SHIFT PHASE ANGLE												
VECTOR VALUES PHASE TO NEUTRAL DIPS: FOR 120V PER PHASE-NEUTRAL												
SAG PHASE-PHASE	PHASE-PHASE VOLTAGE: U1-L2		PHASE-PHASE VOLTAGE: U2-L3		PHASE-PHASE VOLTAGE: U3-L1		VOLTAGES PHASE-NEUTRAL OBTAIN					
	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	PHASE-NEUTRAL: U1-L-N		PHASE-NEUTRAL: U2-L-N		PHASE-NEUTRAL: U3-L-N	
P% DEPTH	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades
100% NO SAG	100% 120V3 Vrms	150	100% 120V3 Vrms	270°	100% 120V3 Vrms	30°	100% 120Vrms	0°	100% 120Vrms	120°	100% 120Vrms	240°
80% L1-L2	80% 0.8*120*√3	150	95% 0.95*120*√3	265	95% 0.95*120*√3	35	85% 102	6	85% 102	114	100% 120	240
70% L1-L2	70% 0.7*120*√3	150	93% 0.93*120*√3	262	93% 0.93*120*√3	38	79% 94,8	10	79% 94,8	110	100% 120	240
40% L1-L2	40% 0.4*120*√3	150	89% 0.89*120*√3	253	89% 0.89*120*√3	47	61% 73,2	25	61% 73,2	95	100% 120	240

SAG PHASE-PHASE	PHASE-PHASE VOLTAGE: U1-L2		PHASE-PHASE VOLTAGE: U2-L3		PHASE-PHASE VOLTAGE: U3-L1		VOLTAGES PHASE-NEUTRAL OBTAIN					
	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	PHASE-NEUTRAL: U1-L-N		PHASE-NEUTRAL: U2-L-N		PHASE-NEUTRAL: U3-L-N	
P% DEPTH	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades
100% NO SAG	100% 120V3 Vrms	150	100% 120V3 Vrms	270°	100% 120V3 Vrms	30°	100% 120Vrms	0°	100% 120Vrms	120°	100% 120Vrms	240°
80% L2-L3	95% 0.95*120*√3	155	80% 0.8*120*√3	270	95% 0.95*120*√3	25	100% 120	0°	85% 102	126	85% 102	234
70% L2-L3	93% 0.93*120*√3	158	70% 0.7*120*√3	270	93% 0.93*120*√3	22	100% 120	0°	79% 94,8	130	79% 94,8	230
40% L2-L3	89% 0.89*120*√3	167	40% 0.4*120*√3	270	89% 0.89*120*√3	13	100% 120	0°	61% 73,2	145	61% 73,2	215

SAG PHASE-PHASE	PHASE-PHASE VOLTAGE: U1-L2		PHASE-PHASE VOLTAGE: U2-L3		PHASE-PHASE VOLTAGE: U3-L1		VOLTAGES PHASE-NEUTRAL OBTAIN					
	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	PHASE-NEUTRAL: U1-L-N		PHASE-NEUTRAL: U2-L-N		PHASE-NEUTRAL: U3-L-N	
P% DEPTH	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE Grades
100% NO SAG	100% 120V3 Vrms	150	100% 120V3 Vrms	270°	100% 120V3 Vrms	30°	100% 120Vrms	0°	100% 120Vrms	120°	100% 120Vrms	240°
80% L3-L1	95% 0.95*120*√3	145	95% 0.95*120*√3	275	80% 0.8*120*√3	30	85% 102	-6	100% 120	120	85% 102	246
70% L3-L1	93% 0.93*120*√3	142	93% 0.93*120*√3	278	70% 0.7*120*√3	30	79% 94,8	-10	100% 120	120	79% 94,8	250
40% L3-L1	89% 0.89*120*√3	133	89% 0.89*120*√3	287	40% 0.4*120*√3	30	61% 73,2	-25	100% 120	120	61% 73,2	265

**Tabla A-5:** Voltajes requeridos en los taps del transformador por cada fase.

SAG PHASE-PHASE	ADDING PHASE+PHASE FOR PHASE-NEUTRAL SHIFT WITH PHASE %L1 + %L2			
	%L1		%L2	
P% DEPTH	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE	VALUE % PHASOR	VALUE PHASE
80%	90%		10%	
L1-L2	107,6	0	12,3	120
70%	86%		16%	
L1-L2	102,9	0	19,0	120
40%	70%		30%	
L1-L2	84,2	0	35,7	120



## 7. Bibliografía

- [1] Comisión Reguladora de energía y gas, Colombia, Resolución 024, "Por la cual se modifican las Normas de Calidad de la Potencia Eléctrica aplicables a los servicios de Distribución de Energía Eléctrica", 2005.
- [2] CREG, resolución 065 de 2012, 2012, Comisión de regulación de Energía y Gas.
- [3] Comisión Reguladora de Energía y Gas, Colombia, Circular 061, Estudio de Diagnóstico de la Calidad de la Potencia, 2010.
- [4] Comisión Reguladora de Energía y Gas, Colombia, Circular 043, Presentación de Resultados Estudio de Calidad de la Potencia Eléctrica, 2010.
- [5] ICONTEC, NTC 5000, Calidad de potencia eléctrica - Definiciones y aspectos fundamentales, 2013, Norma Técnica Colombiana.
- [6] ICONTEC, NTC 5001, Calidad de potencia eléctrica - límites y metodología de evaluación en punto de conexión común, 2008, Norma Técnica Colombiana.
- [7] International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 61000-4-11, Part 4: Testing and measurement techniques - Section 11: Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Test, 2004, edition 2, International Standard.
- [8] International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 61000-4-34, Part 4: Testing and measurement techniques - section 34: Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations immunity test for equipment with input current more than 16 Amper per phase, 1995, Edition 2, International Standard.
- [9] ECAMEC Tecnología , Analisis de eventos de tensión curvas ITIC, CBEMA, y SEMI-F47, 2010, Newsletter, notaa0610.
- [10] Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI, SEMI F47-0706 (Reapproved 0812) - Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity, 2012, [www.semi.org](http://www.semi.org).
- [11] Information Technology Industry Council, ITI, ITIC, Immunity Curve, 2000,

[www.itic.org](http://www.itic.org).

- [12] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE, IEEE Std 1159-2009, Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality , 2009, [www.IEEE.org](http://www.IEEE.org).
- [13] International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 61000-4-15, Part 4: Testing and Measurement techniques - Section 15: Flickermeter, Functional and design specifications, 2003, Edition 1.1, International Standard.
- [14] Math H.J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: voltage sags and interruptions* , 1st ed. New York: IEEE Press, Wiley-Interscience, 1999.
- [15] International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 61000-1-1, Electromagnetic compability (EMC), Part 1: General, Section 1: Application and interpretation of fundamental definitions and terms, 1992, Geneva, Switzerland, International Standard.
- [16] International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 61000-2-4, Part 2: Enviroment, Section 4: Compatibility levels in industrial plants for low-frecuency conducted disturbances, 2002, Edition 2, International Standard.
- [17] Joseph Seymour, Schneider Electric - Data Center Science Center, The Seven Types of Power Problems, White Paper 18 Rev 1, 2010, APC White Paper Library.
- [18] International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 61000-3-3, Electromagnetic Compatibility, Part 3-3: Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current 16A per phase and not subject to conditional connection, 2013, Edition 3, International standard.
- [19] International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 61000-4-1, Electromagnetic Compatibility - Part 4-1: Testing an Measurement Techniques - Overview of IEC 61000-4 Series, 2006, Edition 3, International Standard.
- [20] CENELEC, EN 50160, Voltage Characteristic of Electricity Supplied by Public Distribution Systems, 1999, European Standard.
- [21] International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 61000-3-5, Electromagnetic Compatibility, Part 3-5: Limits - Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 75A, 2009, Edition 2, International Standard.

- [22] International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 61000-3-11, Electromagnetic Coampatibility - Part 3-11: Limits, Limitation of Voltage Changes, Voltage Fluctuations and Flicker in Public Low-Voltage Supply Systems - Equipment with rated current more than 75A and subject to conditional connection, 2000, Edition 1, International Standard.
- [23] International Electrotechnical commission, IEC, IEC 61000-4-30 Electromagnetic Compatibility, Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, 2010, International Standard.
- [24] IEC International electrotechnical commission, IEC 61000-4-14 - Testing and measurement techniques - Voltage fluctuation immunity test for equipment with input current not exceeding 16 A per phase, 2002-07, Edition 1.1.
- [25] Power Standards Lab, Emeryville, Calif Alex McEachern, Voltage Sag Generators: Not as Simple as They Seem, 2001, [www.powerquality.com](http://www.powerquality.com).
- [26] M.E. Meral, M. Tumay A.Teke, Evaluation of available power quality disturbance generators for testing of power quality mitigation devices, 2008, IJ-STA, Special Issue.
- [27] C.Veganzones, F.Blázquez, N.Herrero, D.Ramírez, C.Platero, J.Rodríguez, J.A.Sánchez S.Martínez, Voltage sag generators for analysing wind generators response, 2006, Universidad Politecnica de Madrid.
- [28] T.Wehernd, W.Fuchs C.Wessels, Transformer Based Voltage Sag Generator to Test Renewable Energy Systems during Grid Faults in the Laboratory , 2010, EPE.
- [29] R.Lohde, F.W.fuchs C.Wessels, Transformer Based Voltage Sag Generator to perform LVRT and HVRT Test in the Laboratory , 2010, EPE-PEMC.
- [30] A.M.Hava, O.S. Senturk, A Simple Sag Generator Using SSRs, 2010, IEEE.
- [31] J.A.Cortez, V.Ferreira Da Silva, A.J. Rezek R.Takahashi, A Prototype Implementation of a Voltage SAG Generator, 2008, Induscon.
- [32] Z. Yin, X. Xiao R.Shan, Research on a Novel Series-Connected Voltage Fluctuation Generator, 2009, ICEET.
- [33] G.H. Kwon, T.B. Park, H.J. Kim, J.I. Moon Y.H. Chung, Voltage Sag, Swell, and Flicker Generator with Series Injected Inverter, 2005, IEEE.
- [34] G.H. Kwon, T.B. Park, G.Y. Lim Y.H. Chung, Volttage Sag, and Swell Generator with

- Thyristor Controlled Reactor, 2002, IEEE.
- [35] G.H. Kwon, T.B. Park, K.Y. Lim Y.H. Chung, Voltage Sag and Swell Generator for the Evaluation of Custom Power Devices, 2003, IEEE.
- [36] C.J. Wu W.N. Chang, Desing and application of a Flicker Voltage Generator, 1995, IEEE.
- [37] C.J. Wu, S.S. Yen W.N. Chang, A Flexible Voltage Flicker Teaching Facility For Electric Power Quality Education, 1997, IEEE.
- [38] J.V. Milanovic, K.A. Charalambous S.Z. Dokic, Computer Simulation of Voltage Sag Generator, 2002, IEEE.
- [39] M. Ngoudech, W. Muangjai, K. Yingkayun, T. Boonsai K. Oranpiroj, The 3-Phase Wire Voltage Sag Generator Based on Three Dimensions Space Vector Modulation in abc Coordinates, 2009, ISIE-IEEE.
- [40] ABB, Line Protection, 2011, [www.abb.com.co](http://www.abb.com.co).
- [41] CROVISA , Transformadores Encapsulados, 2014, <http://www.crovisa.com/>.
- [42] Quality Transformer and Electronics, Inc., ZIG-ZAG Transformers, 2014, [www.qte.com](http://www.qte.com).
- [43] Electrical Systems, Transformer Zig-Zag Connection, 2014, [www.skm-eleksys.com](http://www.skm-eleksys.com).
- [44] Electrical Construction and Maintenance C. Sankaran, The Basics of Zigzag Transformers, 2000, [www.ecmweb.com](http://www.ecmweb.com).
- [45] J.V. Milanovic, D.J. Chapman, M.F. McGranaghan S.Z. Djokic, Shortfalls of Existing Methods for Calsification and Presentation of Voltage Reduction Levels, 2005, IEEE.
- [46] Universidade de Coimbra Aníbal T. de Almeida, Power Quality Problems and New Solutions, 2003, International Conference on Renewable Power and Power Quality '03.
- [47] L. Moreira, J. Delgado A. de Almeida, Power Quality Problems and New Solutions, 2000, ISR, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Coimbra.
- [48] Jhon Kyei, Analysis and Desing of Power Acceptability Curves for Industrial Loads, 2001, PSREC, Power Systems Engineering Reserach Center.

- [49] American National Standards Institute, IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 2004, Revision of IEEE Std 519-1981.
- [50] International Electrotechnical commission, IEC, IEC 61000-3-14, Electromagnetic Compatibility, Part 3-14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems, 2011, Edition 1, International Standard.
- [51] Infineon Technologies AG, FZ600R12KE3 Datasheet , 2014, <http://www.infineon.com/>.
- [52] Kemet Inc., C4BSPBX4120ZBJJ, Datasheet, 2014, [www.kemet.com](http://www.kemet.com).
- [53] Eastern Volttaje Research, flexiBrute Heatsink Extrusion, Datasheet, 2012, [www.easternvoltajerereserach.com](http://www.easternvoltajerereserach.com).
- [54] Wakefield Vette, Extruded Heat Skin, 2007, [www.wakefield-vette.com](http://www.wakefield-vette.com).
- [55] Knight Electronics, Inc. Orion Fans, Orion Fans Cataloge, Datasheet, 2014, <http://www.orionfans.com/>.
- [56] On Semiconductor, MC33153, Datasheet, 2014, [www.onsemi.com](http://www.onsemi.com).
- [57] Zetex Semiconductors plc, ZXGD3004E6, Datasheet, 2007, [www.zetex.com](http://www.zetex.com).
- [58] VISHAY INC., WSMS2908L2500JK, Datasheet, 2014, [www.vishay.com](http://www.vishay.com).
- [59] Texas Instruments Incorporated, LF353, Datasheet, 1994, <http://www.ti.com/>.
- [60] EPCOS AG, NTC thermistors for temperature measurement, Series/Type: B57045K, 2013, [www.epcos.com](http://www.epcos.com).
- [61] F.F. Discroll R.F. Couglin, Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales, 1999, Quinta edición.
- [62] Fairchild Semiconductor Corporation, CD4043BC, Datasheet, 2002, [www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com).
- [63] Avago Technologies US, Inc, HFBR-0500Z Series, Datasheet, 2011, [www.avagotech.com](http://www.avagotech.com).
- [64] LEM USA Inc., HAS 50-S through HAS 600-S, Datasheet, 2012, [www.lem.com](http://www.lem.com).

- [65] LEM USA Inc., Isolated Current and Voltage Transducers, 1996, [www.lem.com](http://www.lem.com).
- [66] Texas Instruments Incorporated, LF356\_dtasheet, 2013, [www.ti.com](http://www.ti.com).
- [67] CADDOCK Electronics Inc, Type 1776 Precision Decade Resistor Voltage Dividers, 2004, [www.caddock.com](http://www.caddock.com).
- [68] Texas Instruments Incorporated, ISO124, Precision Lowest-Cost ISOLATION AMPLIFIER, 2005, [www.ti.com](http://www.ti.com).
- [69] Texas Instruments Incorporated, LF442 Dual Low Power JFET Input Operational Amplifier, 2013, [www.ti.com](http://www.ti.com).
- [70] National Instruments Corporation, NI 6040E Family Specifications, 2005, [www.ni.com](http://www.ni.com).
- [71] University of Minnesota W. Durfee, Arduino Microcontroller Guide, 2011, [www.me.umn.edu/courses/me2011/arduino/](http://www.me.umn.edu/courses/me2011/arduino/).
- [72] RS, Radiospares, Radionics, Allied Electronics, ARDUINO UNO, 2014, <http://docs-asia.electrocomponents.com/webdocs/0e8b/0900766b80e8ba21.pdf>.
- [73] Atmel Corporation, 8-bit Microcontroller ATmega328P, 2009, <http://www.atmel.com/>.
- [74] Muhammad Rashid, Electrónica de Potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones, 1993, Ed. Prentice Hall. 2da Edición.
- [75] Willian F. Villamil Carlos D. Rojas, Determinación de la inmunidad de bombillas LFC ante hundimientos de tensión, 2014, Curso Calidad de la Energia, Docente: Ing Andres Pavas Martínez, Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá.
- [76] Daniel Vega Uriel Mora, Tarea 3: Inmunidad, 2014, Curso Calidad de la Energia, Docente: Ing Andres Pavas Martínez, Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá.
- [77] Harold Mazo, Daniel Agudelo Michael Salcedo, , 2014, Curso Calidad de la Energia, Docente: Ing Andres Pavas Martínez, Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá.
- [78] International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 61000-2-5, Electromagnetic Compatibility, Part 2-5: Environment - Description and classification of electromagnetic environments, 2011, Edition 2, International Standard.

- [79] International Electrotechnical Committee, IEC, IEC 61000-4-7, (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, , for power supply systems and equipment connected thereto, 1994, First edition, International Standard.
- [80] American National standard Institute, Inc., ANSI C84.1-2011, American National standard: for Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60Hz), 2011, Revision ANSI C84.1-2006.
- [81] American National Standards Institute, IEEE Standards Board, IEEE C62.41-1991, IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits, 1991, Revision of IEEE C62.41-1980.
- [82] EURELECTRIC, Union of Electricity Industry, Application guide to the European Standard EN50160 on "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", 1995, Electricity product characteristics and electromagnetic compatibility.
- [83] European Union, CE, Council directive 85/374 on the approximation of the laws of the member states relating to the liability for defective products, 1995, Oficial Journal.
- [84] European Union, CE, Council Directive 89/336 on the approximation of the laws of the member states relating to electromagnetic compatibility, 1989, Oficial Journal.
- [85] REO UK LTD Keith Armstrong, A Practical Guide For EN 61000-3-3, and EN 61000-3-11, 2002, [www.reo.co.uk](http://www.reo.co.uk).
- [86] Keith, REO UK LDTA Armstrong, handBook on EN 61000-4-14, Main Voltage Fluctuations, 2000, [www.reo.co.uk](http://www.reo.co.uk).
- [87] Pacific Gas and Electric Company, Voltage SAG Immunity Standards - SEMI F47 and F42, August 2007, Power Quality Bulletin No3.
- [88] EPRI, Electric Power Research Institute Mark Stephens, Power Quality standards: CBEMA, ITIC, SEMI F47, IEC 61000-4-11/34, 2009.