

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**IMPLEMENTAR UN GENERADOR DE FORMA DE  
ONDAS DE TENSIÓN  
ACORDE CON EVENTOS DE CALIDAD DE ENERGÍA  
DEL TIPO FLICKER,  
ARMÓNICOS Y HUECOS DE TENSIÓN**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Carlos Arroyo  
para optar al título  
de Ingeniero Electricista.

Caracas, Octubre de 2016

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **IMPLEMENTAR UN GENERADOR DE FORMA DE ONDAS DE TENSIÓN ACORDE CON EVENTOS DE CALIDAD DE ENERGÍA DEL TIPO FLICKER, ARMÓNICOS Y HUECOS DE TENSIÓN**

TUTOR ACADÉMICO: Dan El Montoya

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Carlos Arroyo  
para optar al título  
de Ingeniero Electricista.

Caracas, Octubre de 2016

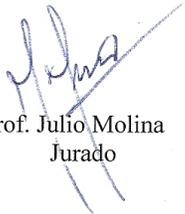
## CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 02 de noviembre de 2016

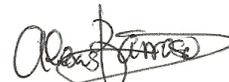
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Carlos J. Arroyo C., titulado:

**“IMPLEMENTAR UN GENERADOR DE FORMA DE ONDAS DE TENSIÓN  
ACORDE CON EVENTOS DE CALIDAD DE ENERGÍA DEL TIPO  
FLICKER, ARMÓNICOS Y HUECOS DE TENSIÓN”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención Industrial, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Julio Molina  
Jurado



Prof. Alexis Barroso  
Jurado



Prof. Dan El Montoya  
Prof. Guía

*A Dios, a mis padres y hermanos.*

## RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarme en camino durante toda la carrera y ser mi guía ante las adversidades.

A Zaida y Carlos, por estar allí cuando mas los necesitaba y por su entrega inalcanzable.

A mis hermanos Astrid y David, en especial para Astrid, por ser mi compañera incondicional, y servirme de apoyo durante toda la carrera, pocos saben que no lo hubiera logrado sin ella.

A mi tutor Dan El Montoya, por ser mi guía, ayudarme en las dificultades del proyecto y estar cuando lo necesite.

Al Departamento de Potencia, por el préstamo de equipos y gracias a todos los profesores que me acompañarán en este camino.

Al Instituto de Ingeniería por permitir el usos de sus instalaciones y equipos, especial mención al Ing. Miguel Arellano.

A Jim Perez, por ayudarme en la redacción recopilamiento de información referente al tema y darme palabras de aliento.

A mis compañeros de universidad, especial mención a David Cen y Carlos González, quienes me ayudaron en los momentos mas difíciles de la misma.

Y a todos aquellos que me dieron palabras de aliento, mi tía Carmen, Yelitze, Alejandro, Carlos, Nohelia y Keily.

# RESUMEN

Carlos José Arroyo Campos  
IMPLEMENTAR UN GENERADOR DE FORMA DE ONDAS DE  
TENSION  
ACORDE CON EVENTOS DE CALIDAD DE ENERGÍA DEL  
TIPO FLICKER,  
ARMÓNICOS Y HUECOS DE TENSION

Tutor Académico: Dr. Dan El Montoya. Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Mención Industrial. Año 2016, 120h.

Palabras Claves: Flicker, Huevo de tensión, Armónicos, Calidad de energía.

**Resumen.-** La creciente competencia entre las empresas requiere el aumento de la eficiencia en la producción, por lo que es necesaria la introducción de dispositivos que funcionan por conmutación en la automatización de procesos mediante la utilización de dispositivos electrónicos y motores eléctricos o bombas de alta eficiencia.

Estos elementos afectan los puntos común en la distribución de energía eléctrica causando perturbaciones a otros usuarios, por lo cual la necesidad de brindar un servicio eléctrico adecuado teniendo la capacidad de medir todas las posibles variables .

En este trabajo especial de grado, se plantea un modelo de generador de los eventos típicos de calidad de energía tales como: Flicker, armónicos y huecos de tensión; con la finalidad de desarrollar y calibrar equipos capaces de medir estos eventos a baja tensión.

# ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN	III
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE GENERAL	VII
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABLAS	XVI
LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS	XIX
INTRODUCCIÓN	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>OBJETIVOS</b>	<b>6</b>
2.1. Objetivo General . . . . .	6
2.2. Objetivos Específicos . . . . .	6
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>8</b>
3.1. El Flicker . . . . .	8
3.1.1. Modelo matemático del flicker . . . . .	9
3.1.2. Medidor de flicker de la norma IEC 61000-4-15 . . . . .	12
3.1.2.1. Bloque 1: Adaptador de tensión de entrada y dispositivo calibrador . . . . .	13
3.1.2.2. Bloque 2: Demodulador cuadrático . . . . .	13
3.1.2.3. Bloque 3: Filtros de ponderación . . . . .	13

3.1.2.4.	Bloque 4: Multiplicador cuadrático y filtro de desplazamiento de la media . . . . .	14
3.1.2.5.	Bloque 5: Análisis estadístico en tiempo real . . .	15
3.1.2.6.	Índice de severidad del flicker de corta y larga duración ( $P_{st}$ y $P_{lt}$ ) . . . . .	16
3.1.3.	Pruebas del flickermetro según norma IEC-61000-4-15 . .	18
3.1.3.1.	Cambios de voltaje sinusoidales/rectangulares . .	19
3.1.3.2.	Variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento . . . . .	22
3.1.3.3.	Combinación de frecuencia y voltaje . . . . .	23
3.1.3.4.	Ensayos para una tensión deformada con múltiples pasos por cero . . . . .	23
3.1.3.5.	Ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos . . . . .	24
3.1.3.6.	Ensayo para saltos de fase . . . . .	25
3.1.3.7.	Ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 % . . . . .	25
3.2.	Armónicos . . . . .	26
3.2.1.	Modelo matemático de armónicos . . . . .	27
3.2.1.1.	Espectro armónico . . . . .	28
3.2.2.	Tasa de distorsión armónica (THD) . . . . .	30
3.2.2.1.	Frecuencia armónica ( $f_{H,h}$ ) . . . . .	30
3.2.2.2.	Orden del armónico (h) . . . . .	30
3.3.	Huecos de tensión . . . . .	31
3.3.1.	Caracterización de los huecos de tensión . . . . .	32

3.3.1.1.	Magnitud y duración . . . . .	32
3.3.2.	Clasificación de los huecos de tensión . . . . .	33
3.3.2.1.	Huecos de tensión rectangulares . . . . .	33
3.3.2.2.	Huecos de tensión no rectangulares . . . . .	34
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>MARCO METODOLÓGICO</b>		<b>37</b>
4.1.	Esquema del sistema desarrollado . . . . .	37
4.1.1.	Computador de escritorio-Sistema operativo Windows XP y Matlab-Simulink . . . . .	37
4.1.2.	Tarjeta de adquisición de datos NI PCI-MIO-16E-4 . . . . .	39
4.1.2.1.	Verificación de funcionamiento . . . . .	41
4.1.3.	Amplificador de potencia Pioneer GM-3602 . . . . .	41
4.1.3.1.	Verificación de funcionamiento . . . . .	42
4.1.4.	Transformador seco General Electric 1kVA 240/480 . . . . .	43
4.2.	Control de señales . . . . .	44
4.2.1.	Bloque de tiempo de simulación . . . . .	44
4.3.	Analizador de redes Fluke 437 . . . . .	46
<b>CAPÍTULO V</b>		
<b>SIMULACIONES DEL GENERADOR DE FLICKER</b>		<b>47</b>
5.1.	Cambios de voltaje sinusoidales/rectangulares . . . . .	47
5.2.	Variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento	51
5.3.	Combinación de frecuencia y voltaje . . . . .	53
5.4.	Ensayos para una tensión deformada con múltiples pasos por cero	54
5.5.	Ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos . . . . .	56
5.6.	Ensayo para saltos de fase . . . . .	57

5.7. Ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 % . . . . .	61
<b>CAPÍTULO VI</b>	
<b>MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS GENERADOR DE FLICKER</b>	<b>63</b>
6.1. Resultados cambios de voltaje sinusoidales/rectangulares . . . . .	63
6.2. Variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento	65
6.3. Combinación de frecuencia y voltaje . . . . .	66
6.4. Ensayos para una tensión deformada con múltiples pasos por cero	66
6.5. Ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos . . . . .	67
6.6. Ensayo para saltos de fase . . . . .	68
6.7. Ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 % . . . . .	68
<b>CAPÍTULO VII</b>	
<b>SIMULACIONES DEL GENERADOR DE ARMÓNICOS</b>	<b>70</b>
<b>CAPÍTULO VIII</b>	
<b>MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS GENERADOR DE ARMÓNICOS</b>	<b>75</b>
8.1. Resultados experimentales del generador de armónicos . . . . .	75
<b>CAPÍTULO IX</b>	
<b>SIMULACIONES DEL GENERADOR DE HUECOS DE TENSIÓN</b>	<b>80</b>
9.1. Huecos de tensión monoestado . . . . .	80
9.2. Huecos de tensión multiestado . . . . .	85
<b>CAPÍTULO X</b>	
<b>MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL GENERADOR DE HUECOS DE TENSIÓN</b>	<b>87</b>

10.1. Resultados de la simulación del generador de hueco de tensión rectangular . . . . .	87
10.2. Resultados de la simulación del generador de hueco de tensión no rectangular . . . . .	88
10.3. Resultados de la simulación del generador de hueco de tensión por arranque de motor . . . . .	89
10.4. Resultados de la simulación del generador de hueco de tensión por saturación de transformador . . . . .	90
10.5. Resultados de la simulación del generador de hueco de tensión multiestados . . . . .	91
<b>CAPÍTULO XI</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>93</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>95</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Tensión cosenoidal contaminado con flicker cosenoidal . . .	10
Figura 3.2. Tensión cosenoidal contaminado con flicker rectangular . .	11
Figura 3.3. Diagrama de bloques del flickermetro de la norma IEC 61000-4-15 . . . . .	12
Figura 3.4. Ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 %, fm=28Hz . . . . .	26
Figura 3.5. Señal de onda cuadrada . . . . .	29
Figura 3.6. Onda cuadrada con sus componentes armónicos [4] . . . .	29
Figura 3.7. Espectro armónico de la figura 3.7 [4] . . . . .	30
Figura 3.8. Hueco de tensión monofásico(Forma de onda rectangular, duración 20 ciclos y magnitud del hueco de 0,52 p.u.[20] . . . . .	31
Figura 3.9. Hueco de tensión magnitud y duración. La detección de limite( V=90 % es representado). [14] . . . . .	32
Figura 3.10. Hueco de tensión con sistema de puesta a tierra.[13] . . . .	33
Figura 3.11. Hueco de tensión multiestado.[20] . . . . .	34
Figura 3.12. Hueco de tensión originado por arranque de motor de inducción.[20]	35
Figura 3.13. Hueco de tensión originado por energizar un transformador.[20]	36
Figura 4.1. Generador de eventos de calidad de energía . . . . .	38
Figura 4.2. Montaje experimental del generador de eventos de calidad de energía . . . . .	39
Figura 4.3. Bloques de simulink de medidor de flicker . . . . .	39
Figura 4.4. Bloque simulink de Discrete Total Harmonic Distortion . .	40

Figura 4.5. Tarjeta de adquisición de datos NI PCI-MIO-16E-4 . . . . .	40
Figura 4.6. Terminales de tarjeta de adquisición de datos NI PCI-MIO-16E-4. . . . .	41
Figura 4.7. Bloque terminal DIN 68-pin . . . . .	42
Figura 4.8. Amplificador de potencia Pioneer GM-3602. Izquierda (vista trasera) y Derecha (vista frontal) . . . . .	42
Figura 4.9. Relación entre ganancia y corriente de salida de la unidad principal . . . . .	43
Figura 4.10. Diagrama de bloques simulink para control de señales . . . . .	45
Figura 4.11. Bloque de tiempo de simulación . . . . .	45
Figura 4.12. Analizador de redes Fluke 437 . . . . .	46
Figura 5.1. Modelo de cambios de voltaje sinusoidales/rectangulares . . . . .	48
Figura 5.2. Cambios de voltaje sinusoidales a 60 Hz . . . . .	49
Figura 5.3. Cambios de voltaje rectangulares a 60 Hz . . . . .	50
Figura 5.4. Modelo de variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento . . . . .	51
Figura 5.5. Variaciones rectangulares a 60 Hz . . . . .	52
Figura 5.6. Modelo de combinación de frecuencia y voltaje . . . . .	53
Figura 5.7. Combinaciones de frecuencia y voltaje a 60 Hz . . . . .	54
Figura 5.8. Modelo de ensayos para una tensión deformada con múltiples pasos por cero . . . . .	55
Figura 5.9. Tensión deformada con múltiples pasos por cero a 60Hz . . . . .	55
Figura 5.10. Modelo de ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos . . . . .	56
Figura 5.11. Ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos 60 Hz . . . . .	57

Figura 5.12. Modelo de ensayos para saltos de fase . . . . .	58
Figura 5.13. Ensayo de salto de fase 60 Hz y $30^\circ$ . . . . .	59
Figura 5.14. Ensayo de salto de fase 60 Hz y $-30^\circ$ . . . . .	59
Figura 5.15. Ensayo de salto de fase 60 Hz y $45^\circ$ . . . . .	60
Figura 5.16. Ensayo de salto de fase 60 Hz y $-45^\circ$ . . . . .	60
Figura 5.17. Modelo de ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 % . . . . .	61
Figura 5.18. Ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 % a 60Hz . . . . .	62
Figura 7.1. Modelo simulink de generador de armónicos . . . . .	70
Figura 7.2. Señal contaminada con armónicos de la prueba 1 . . . . .	72
Figura 7.3. Señal contaminada con armónicos de la prueba 1-Análisis espectro armónico . . . . .	72
Figura 7.4. Señal contaminada con armónicos de la prueba 2 . . . . .	73
Figura 7.5. Prueba de generador de armónicos a 60Hz- Análisis espectro armónico . . . . .	74
Figura 8.1. Prueba de generador de armónicos prueba 1- Análisis en tiempo . . . . .	76
Figura 8.2. Prueba de generador de armónicos prueba 1- Análisis espec- tro armónico . . . . .	76
Figura 8.3. Prueba de generador de armónicos prueba 2-Análisis en tiempo	78
Figura 8.4. Prueba de generador de armónicos prueba 2- Análisis espec- tro armónico . . . . .	78
Figura 9.1. Modelo Simulink del generador de huecos de tensión mono- estado . . . . .	81

Figura 9.2. Generador de huecos de tensión rectangulares a 60Hz . . . .	82
Figura 9.3. Generador de huecos de tensión rectangulares a 60Hz en p.u	82
Figura 9.4. Generador de huecos de tensión no rectangulares a 60Hz .	83
Figura 9.5. Generador de huecos de tensión no rectangulares a 60Hz en p.u . . . . .	83
Figura 9.6. Generador de huecos de tensión por arranque de motor a 60Hz . . . . .	84
Figura 9.7. Generador de huecos de tensión por arranque de motor a 60Hz en p.u . . . . .	84
Figura 9.8. Generador de huecos de tensión por saturación de transfor- mador 60Hz . . . . .	85
Figura 9.9. Generador de huecos de tensión por saturación de transfor- mador a 60Hz en p.u . . . . .	85
Figura 9.10. Generador de huecos de tensión multiestado 60Hz . . . . .	86
Figura 9.11. Generador de huecos de tensión multiestado a 60Hz en p.u	86
Figura 10.1. Generador de huecos de tensión rectangulares a 60Hz en p.u	87
Figura 10.2. Generador de huecos de tensión no rectangulares a 60Hz en p.u . . . . .	88
Figura 10.3. Generador de huecos de tensión por arranque de motor a 60Hz en p.u . . . . .	89
Figura 10.4. Generador de huecos de tensión por saturación de transfor- mador a 60Hz en p.u . . . . .	90
Figura 10.5. Generador de huecos de tensión multiestado a 60Hz en p.u	92

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Especificaciones de pruebas para flickermetros. (IEC 61000-4-15,2010) . . . . .	19
Tabla 3.2. Respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión senoidales 120 V 60/50 Hz (Fluctuación de tensión relativa de entrada $\frac{\Delta V}{V} = V$ para una unidad de flicker instantáneo) . . . . .	20
Tabla 3.3. Respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión rectangulares 120 V 60/50 Hz (Fluctuación de tensión relativa de entrada $\frac{\Delta V}{V} = V$ para una unidad de flicker instantáneo)[11] . . .	21
Tabla 3.4. Especificaciones de ensayo para el clasificador del flickermetro	22
Tabla 3.5. Especificaciones de ensayo para una combinación de variaciones de frecuencia y de tensión para un sistema de 120 V.[11] . .	23
Tabla 3.6. Especificaciones de ensayo para una tensión deformada con múltiples pasos por cero - Medidores de flicker de clase F1 - Sistema de 120 V y 60 Hz.[11] . . . . .	23
Tabla 3.7. Tasa de modulación sinusoidal a 8.8 Hz para el ensayo de tensión deformada - Medidores de flicker de clase F1 - Sistema de 120 V.[11] . . . . .	24
Tabla 3.8. Especificaciones de ensayo para los armónicos con una banda lateral - Medidores de flicker de clase F1 - Sistema de 120 V. [11] .	24
Tabla 3.9. Especificaciones de ensayo para saltos de fase - Medidores de flicker clase F1 - sistema de 120 V.[11] . . . . .	25
Tabla 3.10. Especificaciones para cambios rectangulares con ciclo de funcionamiento . . . . .	26

Tabla 4.1. Características del transformador monofásico . . . . .	44
Tabla 5.1. Resultados de simulaciones del Pinst-Ensayo cambios de voltaje sinusoidales a 60 Hz . . . . .	49
Tabla 5.2. Resultados de simulaciones del Pinst-Ensayo cambios de voltaje rectangular a 60 Hz . . . . .	50
Tabla 5.3. Resultados de simulaciones del Pst-Variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento . . . . .	52
Tabla 5.4. Resultados de simulaciones del Pinst-Ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos a 60Hz . . . . .	57
Tabla 5.5. Resultados de simulaciones del Pst-Ensayo para saltos de fase a 60Hz . . . . .	61
Tabla 6.1. Resultados del $P_{inst}$ -Ensayo cambios de voltaje sinusoidales a 60 Hz. Pruebas obligatorias. . . . .	64
Tabla 6.2. Resultados del $P_{inst}$ -Ensayo cambios de voltaje rectangulares a 60 Hz. Pruebas obligatorias. . . . .	64
Tabla 6.3. Resultados $P_{st}$ para variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento. . . . .	65
Tabla 6.4. Resultados Pinst para combinación de voltaje y frecuencia a 60Hz. . . . .	66
Tabla 6.5. Resultados $P_{inst}$ para ensayo para una tensión deformada con múltiples pasos por cero a 60 Hz . . . . .	67
Tabla 6.6. Resultados $P_{inst}$ para ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos a 60 Hz. . . . .	67
Tabla 6.7. Resultados Pst para ensayo para saltos de fase a 60 Hz. . .	68

Tabla 6.8. Resultados Pst para ensayo para variaciones de tensión rec- tangulares con un ciclo de utilización del 20 % a 60 Hz . . . . .	69
Tabla 7.1. Tasa de distorsión armónica para simulación la prueba 1 . . .	71
Tabla 7.2. Orden de armónico y amplitud utilizado para simulación de la prueba 1 . . . . .	71
Tabla 7.3. Orden de armónico y amplitud utilizado para simulación de la prueba 2 . . . . .	73
Tabla 8.1. Orden de armónico y amplitud utilizado para simulación de 60Hz . . . . .	75
Tabla 8.2. THD de voltaje prueba 1 . . . . .	76
Tabla 8.3. Orden de armónico y amplitud utilizado para simulación de 60Hz . . . . .	77
Tabla 8.4. THD de voltaje prueba 2 . . . . .	77
Tabla 10.1. Resultados de duración de hueco rectangular a 60 Hz . . . . .	88
Tabla 10.2. Resultados de duración de hueco no rectangular a 60 Hz . . .	88
Tabla 10.3. Resultados de duración de hueco de tensión por arranque de motor a 60 Hz . . . . .	89
Tabla 10.4. Resultados de duración de hueco de tensión por saturación de transformador 60 Hz . . . . .	90
Tabla 10.5. Datos de prueba . . . . .	91
Tabla 10.6. Resultados de duración de hueco de tensión multiestados a 60 Hz . . . . .	92

## LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

**AM** Amplitude Modulation

**DAQ** Data Acquisition

**FM** Frequency Modulation

**IEC** International Electrotechnical Commission

# INTRODUCCIÓN

En la actualidad el estudio de la calidad de energía ha adquirido una gran importancia, esto debido a la necesidad de aumentar la productividad y competitividad de las empresas; entre los principales equipos utilizados para optimización de procesos se encuentran:

1. Motores eléctricos o bombas de alta eficiencia.
2. Automatización de procesos mediante la utilización de dispositivos electrónicos (Variadores de frecuencia, Compensadores estáticos de potencia, PLC, PAC, etc)

La calidad de energía eléctrica se entiende como la energía eléctrica que es suministrada a los equipos, dispositivos con características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes; entre estas condiciones se encuentran la ausencia interrupciones, huecos de tensión, sobretensiones y deformaciones producidas por armónicos o fluctuaciones rápidas de tensión que impidan mantener la continuidad de servicio.

En este trabajo especial de grado se cubrirá los eventos relacionados con armónicos, huecos de tensión y flicker típicos de calidad de energía producto de perturbaciones en la forma de onda de tensión.

La distorsión armónica es la corrupción de la señal senoidal fundamental a frecuencias múltiples de la misma. Entre los síntomas observados está el sobrecalentamiento de transformadores, conductores neutros y otros equipos.

Los huecos de tensión pueden ser causados por el encendido de grandes cargas y la libreación remota de fallas por parte de los equipos de red eléctrica. Entre otras causas se encuentra el arranque de grandes motores dentro de una planta industrial.

El flicker es una variación sistemática de la forma de onda de tensión las cuales producen efectos irritantes para la visión dado a que producen variaciones en la intensidad luminosa. Típicamente son producidas por arranque de motores y otros equipos con un régimen de operación, en un punto de acoplamiento común (PCC) entre el usuario y estas cargas.

Los eventos de calidad de energía se definirán y generarán desde un computador personal PC equipado con una tarjeta de adquisición y control. Con el fin de garantizar una adecuada velocidad de procesamiento se utilizará una tarjeta de adquisición de datos NI PCI-MIO-16E-4.

A la salida de la tarjeta de adquisición de datos la señal sera adecuada a la entrada de un amplificador de audio. En el amplificador de audio la señal se amplifica de manera de obtener niveles mínimos de potencia para realizar pruebas sobre cargas de baja potencia. Finalmente para garantizar niveles de baja tensión (120 AC) a la salida debe diseñarse una etapa final de adecuación de niveles de tensión.

El objetivo de este trabajo especial de grado es la generación de formas de onda en baja tensión acordes con los principales eventos de la calidad a saber: armónicos, flicker y huecos de tensión. Esto con el fin de estudiar los estándares nacionales e internacionales que rigen la materia para que en un futuro desarrollar a través de proyectos equipos que detecten, clasifiquen, evalúen y mitiguen estas perturbaciones.

Este trabajo propone un generador de eventos de calidad de energía, acorde con las definiciones de los estándares IEC-61000-4-7, IEC-61000-4-11, IEC-61000-4-15.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como parte de la obligación de proveer y garantizar un servicio eléctrico adecuado para el consumidor, existe la necesidad de regular la calidad del servicio eléctrico.

Para determinar los índices que regulan la calidad, diferentes organismos mundiales como el Banco Mundial, evalúan diversos indicadores, como son: la continuidad del servicio (duración y cantidad de interrupciones), calidad de la onda (nivel de tensión, Flicker, presencia de armónicos, etc.) así como la atención al cliente.

La ley Orgánica del Sistema y Servicio Eléctrico promulgada en diciembre de 2010 en el Título II, Capítulo II de las Obligaciones del Operador y Prestador del Servicio en su Artículo 31 numeral 3 especifica que el operador y prestador del servicio deberá cumplir con la obligación de "Prestar el servicio eléctrico bajo los criterios de confiabilidad, eficiencia, calidad, equidad, solidaridad, no discriminación, transparencia, sustentabilidad económica y financiera, cumpliendo las normas técnicas de instalación, operación y de seguridad, según la normativa que a este efecto apruebe el Ministerio del Poder Popular con competencia en materia de energía eléctrica".

Las Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad promulgada en Gaceta Oficial Nro. 37825 del 25/11/2003, dictada por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica indica los parámetros de calidad tanto comerciales como

técnicos que deben cumplir las empresas del sector. En este sentido la norma, en su Artículo 2 indica las siguientes Áreas como aquellas en las que se evalúa la calidad de servicio, las cuales son definidas en el Artículo 3:

- Calidad del Producto Técnico: Grado de cumplimiento de los valores admisibles establecidos en la resolución, determinado por mediciones realizadas de los niveles de tensión del fluido eléctrico y la forma de onda de la tensión suministrada por la distribuidora.

- Calidad del Servicio Técnico: Grado de cumplimiento de los valores admisibles establecidos en la Resolución, determinado por las interrupciones del fluido eléctrico conforme a la frecuencia y duración de las mismas.

- Calidad del Servicio Comercial: Grado de cumplimiento de los lapsos establecidos en esta Resolución, en la atención de los requerimientos y reclamos de los usuarios.

Los aspectos de Calidad del Producto Técnico que se controlan son:

- Nivel de tensión: Interrupciones.
- Las perturbaciones en la forma de onda de la tensión: Armónicos, Fluctuaciones rápidas de tensión (flicker).

Este Trabajo Especial de Grado pretende desarrollar un prototipo de generador de eventos de calidad de energía con el fin contribuir con la investigación y desarrollo equipos capaces medir y cuantificar estos eventos, en nuestro caso los flicker, armónicos y huecos de tensión.

## CAPÍTULO II

### OBJETIVOS

#### 2.1. Objetivo General

Generar formas de ondas contaminadas con eventos de calidad de energía de los tipos armónicos, huecos de tensión y flicker en baja tensión.

#### 2.2. Objetivos Específicos

1. Validar dispositivos necesarios para la implementación del generador de eventos de calidad de energía.
2. Programar mediante el uso de un PC los eventos de calidad de energía flicker, armónicos y huecos de tensión definidos en los estándares IEC-61000-4-7, IEC-61000-4-11, IEC-61000-4-15.
3. Generar a la salida de una tarjeta de adquisición o de un procesador digital de señales conectado a un PC las formas de ondas de los eventos de calidad de energía.
4. Amplificar, usando un amplificador de audio, las señales de los eventos de calidad de energía generadas a la salida de la tarjeta de adquisición o procesador digital de señales.
5. Adecuar la señal de salida del amplificador de audio para que el nivel de tensión sea 120 VAC.

6. Realizar pruebas y verificaciones del funcionamiento del generador de baja tensión.

## CAPÍTULO III

### MARCO TEÓRICO

#### 3.1. El Flicker

El flicker o parpadeo de la luz se define como "la impresión subjetiva de la fluctuación de la luminancia"[22]. Es un fenómeno de origen fisiológico visual que acusan los usuarios de lámparas alimentadas por una fuente común a una iluminación y a una carga perturbadora. Este efecto de parpadeo que causa molestias en los usuarios que se manifiesta en lamparas de baja de tensión, aunque las cargas perturbadoras puedan encontrarse conectadas a cualquier nivel de tensión. El flicker es el resultado de fluctuaciones rápidas de amplitud pequeña en la tensión de alimentación.

Estas fluctuaciones son generadas principalmente por:

1. Variaciones de tensión periódicas o erráticas permanentes; Se deben a cargas o conjunto de cargas cuya utilización se caracteriza por una variación constante de la demanda de potencia: Hornos de arco, maquinas de soldar, etc.
2. Variaciones bruscas y repetitivas de tensión; Conexión y desconexión asociado a cargas con un ciclo de trabajo corto: Nevera domestica, arranque de motores, conmutación de condensadores para la corrección del factor de potencia.
3. Mal funcionamiento del sistema de iluminación.

### 3.1.1. Modelo matemático del flicker

Matemáticamente las fluctuaciones asociadas al flicker poseen un modelado de la misma forma que una modulación AM convencional, donde la señal portadora es la señal de tensión de la red a 60 Hz y la señal moduladora es la variación de tensión asociada al flicker, cuya frecuencia se sitúa por lo general entre 0.5 Hz y 25 Hz provocando un cambio en la amplitud de la portadora de no más del 10 % de la amplitud de la misma.

Una señal cosenoidal modulada en amplitud obedece a la siguiente expresión temporal (Oviedo and Rueda 2008):

$$s(t) = Ac \cdot (1 + m \cdot g(t)) \cdot \cos(2 \cdot fc \cdot \pi \cdot t) \quad (3.1)$$

Donde  $s(t)$  corresponde a la señal moduladora normalizada en amplitud y  $m$  corresponde al coeficiente de modulación. Este coeficiente representa el cambio de amplitud presente en una forma de onda de amplitud modulada. El porcentaje de modulación es el coeficiente de modulación expresado en porcentaje.

La función  $g(t)$  mostrada a continuación se encuentra normalizada en amplitud, esto es necesario ya que matemáticamente  $m$  incluye la amplitud de la señal moduladora para el caso de una variación de amplitud cosenoidal, es decir:

$$g(t) = \cos(2 \cdot \pi \cdot fm \cdot t) \quad (3.2)$$

Sustituyendo la ecuación 3.2 en 3.1, se obtiene la ecuación 3.3.

$$s(t) = A_c \cdot \cos(2 \cdot \pi f_c \cdot t) + A_c \cdot m \cdot \cos(2 \cdot \pi f_m \cdot t) \cos(2 \cdot \pi f_c \cdot t) \quad (3.3)$$

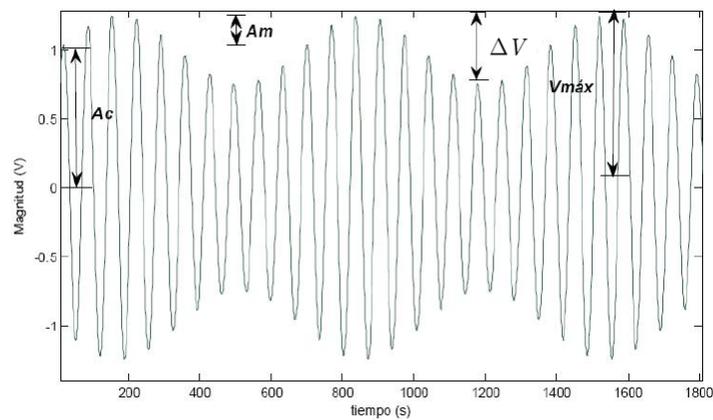
Y mediante manipulación de ley de senos y cosenos se obtiene la ecuación 3.4

$$s(t) = A_c \cdot \cos(2 \cdot f_c \cdot \pi \cdot t) + A_c \cdot m \cdot [\cos(2 \cdot \pi \cdot (f_c - f_m) \cdot t) + \cos(2 \cdot \pi \cdot (f_c + f_m) \cdot t)] \quad (3.4)$$

La ecuación 3.4 representa el modelo matemático de una señal de tensión cosenoidal contaminada con un flicker cosenoidal. El modelo se basa en el efecto de modulación de amplitud con el siguiente coeficiente de modulación  $m$  :

$$m = \frac{A_m}{A_c} \quad (3.5)$$

$A_c$  es la amplitud máxima de la señal cosenoidal de alimentación y  $A_m$  es el máximo en la amplitud de la variación del flicker.



**Figura 3.1.** Tensión cosenoidal contaminado con flicker cosenoidal (Oviedo and Rueda 2008)

Se considera una variación flicker rectangular, la ecuación que regiría la forma de onda modulada en amplitud es 3.6:

$$s(t) = A_c \cdot \left[ 1 + \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{2} \cdot \text{sign}(\cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t)) \right] \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t) \quad (3.6)$$

Donde:

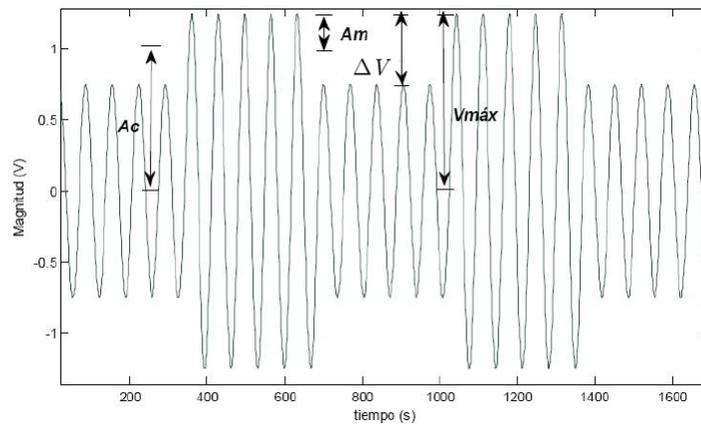
$A_c$ : Amplitud de la portadora sin modular.

$A_m$ : Amplitud de la moduladora.

$f_c$ : Frecuencia de la portadora sin modular.

$\frac{\Delta V}{2}$ : Coeficiente de modulación.

$f_m$ : Frecuencia de la moduladora.



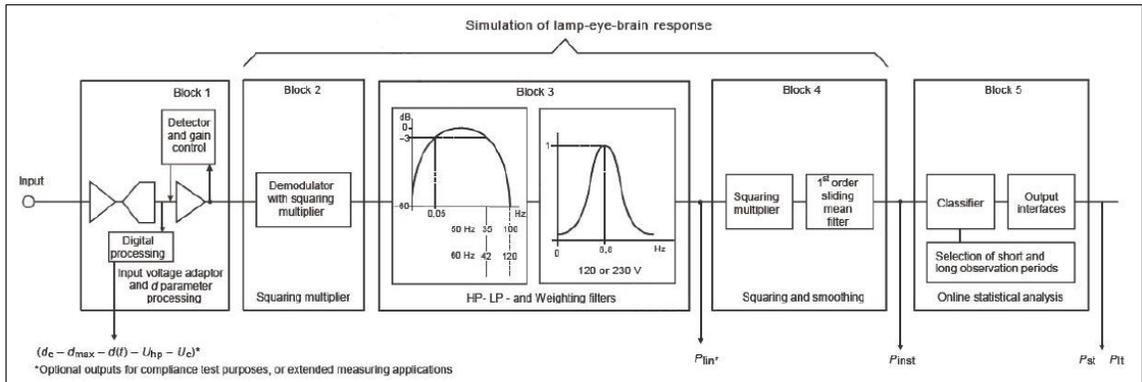
**Figura 3.2.** Tensión cosenoidal contaminado con flicker rectangular (Oviedo and Rueda 2008)

### 3.1.2. Medidor de flicker de la norma IEC 61000-4-15

Todos los tipos de fluctuaciones de tensión pueden evaluarse mediante medición directa utilizando un medidor de flicker que cumpla con las especificaciones de la norma IEC 61000-4-15 (2010). Este método hace referencia para la aplicación de los límites establecidos en la norma IEC 61000-3-3.

La norma IEC 61000-4-15, presenta las especificaciones funcionales y diseño para la elaboración de medidores de flicker. Los dispositivos podrán indicar el flicker instantáneo para todas las formas de onda de fluctuaciones de tensión que pueden encontrarse en la practica.

La estructura del flickermetro se presenta en el diagrama de bloques de la figura 3.3 .



**Figura 3.3.** Diagrama de bloques del flickermetro de la norma IEC 61000-4-15 [11]

El flickermetro de la norma IEC 61000-4-15 puede dividirse en dos partes funcionales. La primera abarca los bloques 2, 3 y 4 de la figura 3, simula la respuesta de la cadena lámpara-ojo-cerebro. La segunda parte, que consta del bloque 5, realiza el análisis estadístico en tiempo real y la presentación de los resultados.

### **3.1.2.1. Bloque 1: Adaptador de tensión de entrada y dispositivo calibrador**

Este bloque contiene un circuito adaptador de tensión que escala el valor eficaz de la tensión de entrada a un nivel de referencia constante sin modificar la fluctuación relativa de la modulación flicker. De esta forma las medidas de flicker pueden ser realizadas independientemente del nivel de tensión de entrada y son expresadas en relación porcentual. El bloque 1 también contiene un generador de señales que comprueba la calibración del medidor flicker.

### **3.1.2.2. Bloque 2: Demodulador cuadrático**

La función de este bloque es recuperar la fluctuación de tensión elevando al cuadrado la tensión de entrada escalada al nivel de referencia, para simular así el comportamiento de una lámpara. A la salida de este bloque se debe tener una tensión proporcional a la amplitud de la fluctuación de modulación flicker.

### **3.1.2.3. Bloque 3: Filtros de ponderación**

El bloque 3 se compone de dos filtros dispuestos en cascada y un selector de márgenes de medida que puede estar antes o después de los filtros selectivos .

El primer filtro elimina las componentes de corriente continua y de rizado al doble de la frecuencia de la red a la salida del demodulador cuadrático (las amplitudes de las componentes a frecuencias superiores se asumen despreciables). El filtro debe incorporar una sección pasaalto de primer orden con una atenuación de 3 dB sugerida para una frecuencia de 0.05Hz y una sección pasabajo para la cual se sugiere un filtro Butterworth de sexto orden con una atenuación de 3 dB a 42 Hz. Estas especificaciones son dadas para un sistema de alimentación 120V/60Hz.

El segundo filtro simula la respuesta en frecuencia a las fluctuaciones senoidales de tensión de una lámpara de gas con filamento enrollado (60 W/120 V) combinado con el sistema de visión humano. La función respuesta está basada en el umbral de perceptibilidad encontrada a cada frecuencia para el 50 % de las personas sometidas a prueba.

Se asume que el filtro que suprime la portadora definida anteriormente tiene una influencia despreciable en el ancho de banda ocupado por las señales de fluctuación de tensión flicker se puede modelar la respuesta global o total del bloque 3 a través de la función de transferencia de la ecuación 3.7

$$H(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \times \frac{\omega_3\omega_4}{\omega_2} \frac{s + \omega_2}{(s + \omega_3)(s + \omega_4)} \quad (3.7)$$

Donde para el sistema 120 V/60 Hz:

$$k = 1,6357$$

$$\lambda = 2\pi 4,167375$$

$$\omega_1 = 2\pi 9,077169$$

$$\omega_2 = 2\pi 2,939902$$

$$\omega_3 = 2\pi 1,394468$$

$$\omega_4 = 2\pi 17,31512$$

#### **3.1.2.4. Bloque 4: Multiplicador cuadrático y filtro de desplazamiento de la media**

El bloque 4 realiza básicamente 2 funciones:

1. Eleva al cuadrado la señal flicker ponderada para simular la percepción no lineal del sistema ojo-cerebro.

2. Desplaza la media de la señal flicker para simular el efecto de almacenamiento en el cerebro. El multiplicador cuadrático debe tener márgenes de funcionamiento entrada-salida suficientes para situar el nivel admisible de flicker a 8.8 Hz, el desplazamiento de la media sera realizado a traves de la función de transferencia de un filtro resistivo-capacitivo pasa bajo de primer orden con una constante de tiempo de 300 ms. A la salida de este bloque se tiene la sensación instantánea de flicker  $P_{inst}$ .

### 3.1.2.5. Bloque 5: Análisis estadístico en tiempo real

El bloque 5 incorpora un microprocesador que realiza un análisis estadístico en tiempo real de la sensación instantánea de flicker permitiendo así el cálculo de parámetros de medida más significativos como el  $P_{st}$  y el  $P_{lt}$ . El análisis estadístico debe realizarse subdividiendo la amplitud del flicker instantáneo en un número adecuado de clases y codificada. Para esto los valores mínimos para los parámetros frecuencia y muestreo, resolución y clases deben ser de 50 Hz, 6 bits y 64 clases respectivamente. Cada vez que aparece un valor apropiado el contador de la clase correspondiente se incrementa en una unidad. De esta manera se obtiene la función de distribución de frecuencia de los valores de entrada. El resultado final al termino del intervalo de medida (generalmente de 10 min) es la duración del flicker instantáneo en cada clase. Sumando el contenido de los contadores de todas las clases y expresando el valor del contador de cada clase en proporción con la suma total se obtiene una función de densidad de probabilidades de la sensación instantánea de flicker. De esta función se obtiene la distribución acumulativa de probabilidades usada en el método estadístico de evaluación del indice de severidad del flicker a corto plazo  $P_{st}$ .

En el procesamiento en tiempo real, inmediatamente después de la conclusión de cada intervalo de tiempo corto, comienza el análisis estadístico del siguiente intervalo y los resultados de los intervalos que ya han transcurrido estarán disponibles a la salida. De esta manera estarán disponibles los índices encontrados para evaluar el  $P_{lt}$  o medida de severidad del flicker a largo plazo (generalmente calculado para periodo de tiempo de 2 horas, es decir, calculado a partir de 12 mediciones consecutivas del  $P_{st}$ ).

### 3.1.2.6. Índice de severidad del flicker de corta y larga duración ( $P_{st}$ y $P_{lt}$ )

El método de evaluación de la severidad del flicker de corta duración ( $P_{st}$ ) se basa en el cálculo de la función distribución acumulativa de la sensación instantánea de flicker según el estándar IEC 61000-4-15. En este sentido se realiza un muestreo del flicker instantáneo en función del tiempo con el fin de construir un histograma. Luego, las muestras se agrupan en clases según su valor dividiéndose la amplitud del histograma obtenido entre el número de muestras total. De esta manera se obtiene la función densidad de probabilidades  $f_X(x)$  y a partir de esta la función de probabilidad acumulativa  $F_X(x)$ .

La función de probabilidad acumulativa se plantea acumulando probabilidades hacia adelante y no hacia atrás como usualmente se hace, es decir:

$$F_X(x) = P\{X \geq x\} = \int_x^{\infty} f_X(x) dx. \quad (3.8)$$

Dado que para obtener la función densidad de probabilidades se dividió el histograma entre el número de muestras consideradas en el período de observación, un punto de la función de probabilidades acumulativa ( $x; F_X(x)$ ) tiene coordenada en el eje horizontal  $x$  igual a la sensación instantánea de flicker, y coordenada en

el eje vertical  $F_X(x)$  el porcentaje de tiempo respecto al período de observación donde se excede el valor  $x$  de la sensación instantánea de flicker.

Para obtener los índices de severidad del flicker se deben leer de la función de probabilidad acumulativa, los valores instantáneos de flicker sobrepasados 0.1 %, 1 %, 3 %, 10 % y 50 % del tiempo de observación que normalmente es 10 minutos. Estos valores  $P_{0,1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$  alimentan el algoritmo multipunto que determina el  $P_{st}$ . El  $P_{st}$  se define por la ecuación:

$$P_{st} = \sqrt{k_{0,1} \cdot P_{0,1} + k_1 \cdot P_1 + k_3 \cdot P_3 + k_{10} \cdot P_{10} + k_{50} \cdot P_{50}} \quad (3.9)$$

Los coeficientes de ponderación  $k_n$  permiten que la curva límite de molestia del flicker de la norma IEC se corresponda con el valor constante de  $P_{st}=1$ , además los coeficientes de ponderación permiten que la curva límite de molestia del flicker de la norma IEC se corresponda con el valor constante de  $P_{st}=1$ .

$$k_{0,1} = 0,0314$$

$$k_1 = 0,0525$$

$$k_3 = 0,0657$$

$$k_{10} = 0,28$$

$$k_{50} = 0,08$$

La severidad del flicker de larga duración ( $P_{lt}$ ) se calcula a partir de las mediciones de severidad del flicker de corta duración ( $P_{st}$ ) a través de la fórmula siguiente:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N}} \quad (3.10)$$

Donde los parámetros  $P_{sti}$  ( $i=1,2,3,\dots$ ) son los valores consecutivos encontrados para el  $P_{st}$ . El  $P_{lt}$  se calcula a partir de los valores de  $P_{st}$  en una duración adecuada según el ciclo de la carga o en un período de tiempo durante el cual un observador pueda ser sensible al flicker (normalmente 2 horas). La magnitud del límite tolerable para el  $P_{lt}$  es 0.74 [9].

En los casos en que deba tomarse en cuenta el efecto combinado de varias cargas perturbadoras funcionando aleatoriamente o cuando las fuentes de flicker con ciclos de trabajo largos y variables deban considerarse, debe calcularse el índice de severidad del flicker a largo plazo ( $P_{lt}$ ). Para su calculo deberá usarse los  $P_{st}$  a lo largo de un período lo suficientemente largo para que un observador pueda reaccionar al flicker.

### 3.1.3. Pruebas del flickermetro según norma IEC-61000-4-15

La norma IEC 61000-4-15 señala las pruebas que deben realizarse a los instrumentos de medición para estar bajo los estándares de la misma. En este sentido los dispositivos podrán indicar el flicker instantáneo para todas las formas de onda de fluctuaciones de tensión que puedan encontrarse en la práctica. Tres clases de flickermetro están definidos:

Clase F1, flickermetros de propósito general, adecuados para supervisión de calidad de energía así como también las pruebas de funcionamiento.

Clase F2, su uso esta enfocado a productos que cumplan con las pruebas de la IEC 61000-3-3 O IEC 61000-3-11 que operen en ambientes controlados, con frecuencia y fase constante y fluctuaciones de tension controladas.

Clase F3, Utilizados en encuestas de calidad de energía, solución de problemas y otras aplicaciones donde las mediciones de baja incertidumbre no sean requeridas y comparables a calidad de energía de equipos medidores de clase S.

La tabla 3.1 nos muestra las especificaciones de pruebas que se realizan a los flickermetros dependiendo de su clase.

Características de voltaje	Intención	Valor usado para la prueba	Clases del flickermetro		
			F1	F2	F3
Cambios de voltaje sinusoidal y rectangular	Prueba las características de respuesta del filtro y el escalamiento	Pinst	F1	F2	F3
Cambios de voltaje rectangular y prueba de desempeño	Prueba el clasificador y algoritmos de evaluación estadística	Pst	F1	F2	F3
Cambios de frecuencia y voltaje	Prueba la medición del circuito	Pinst	F1		
Distorsiones de voltaje con múltiples cruces por cero	Prueba la estabilidad del circuito de control	Pinst	F1		
Armonicos con banda lateral	Prueba la entrada del ancho de banda	Pinst	F1		
Salto de fase	Prueba la estabilidad del circuito de control de entrada, el ancho de banda de entrada y la clasificación	Pst	F1	F2	
Variaciones de tensión rectangulares con ciclo de utilización	Ensayo de los algoritmos de los ciclos de utilización	Pst	F1	F2	

**Tabla 3.1.** Especificaciones de pruebas para flickermetros. (IEC 61000-4-15,2010) [11]

### 3.1.3.1. Cambios de voltaje sinusoidales/rectangulares

Para los medidores de flicker, debe verificarse la respuesta total desde la entrada a la salida  $P_{inst}$  ante variaciones de tensión sinusoidales y rectangulares. Para el caso de variaciones de tensión senoidales, todos los puntos del ensayo de las tablas 3.2 y rectangulares 3.3 del sistema 120 V y 60 Hz, donde el máximo de la sensación instantánea de flicker  $P_{inst,max}$  debe ser igual a 1,00 con una tolerancia de  $\pm 8\%$ . Las frecuencias moduladoras en negritas son obligatorias, estas se seleccionan porque están cerca de los puntos de inflexión, y a lo largo de los puntos importantes en la curva de respuesta del flicker normalizado.

Hz	Fluctuación de voltaje $\frac{\Delta V}{V}$ [%]		Hz	Fluctuación de voltaje $\frac{\Delta V}{V}$ [%]	
	120V/60Hz	120V/50Hz		120V/60Hz	120/50Hz
<b>0,5</b>	<b>2,453</b>	<b>2,453</b>	10	0,341	0,341
1	1,465	1,465	10,5	0,355	0,355
<b>1,5</b>	<b>1,126</b>	<b>1,126</b>	11	0,373	0,373
2	0,942	0,942	11,5	0,394	0,394
2,5	0,815	0,815	12	0,417	0,417
3	0,717	0,717	13	0,469	0,469
3,5	0,637	0,637	14	0,528	0,528
4	0,570	0,570	15	0,592	0,592
4,5	0,514	0,514	16	0,660	0,660
5	0,466	0,466	17	0,734	0,734
5,5	0,426	0,426	18	0,811	0,811
6	0,393	0,393	19	0,892	0,892
6,5	0,366	0,366	<b>20</b>	<b>0,977</b>	<b>0,978</b>
7	0,332	0,332	21	1,067	1,068
7,5	0,332	0,332	22	1,160	1,162
8	0,323	0,323	23	1,257	1,261
<b>8,8</b>	<b>0,321</b>	<b>0,321</b>	24	1,359	1,365
9,5	0,329	0,329	<b>25</b>	<b>1,464</b>	1,476
			<b>33 1/3</b>	<b>2,570</b>	<b>3,111</b>
			<b>40</b>	<b>4,393</b>	

**Tabla 3.2.** Respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión senoidales 120 V 60/50 Hz (Fluctuación de tensión relativa de entrada  $\frac{\Delta V}{V} = V$  para una unidad de flicker instantáneo)

[11]

Hz	Fluctuación de voltaje $\frac{\Delta V}{V}$		Hz	Fluctuación de voltaje $\frac{\Delta V}{V}$	
	120V/60Hz	120V/50Hz		120V/60Hz	120V/50Hz
<b>0,5</b>	<b>0,598</b>	<b>0,597</b>	10	0,266	0,265
1	0,548	0,47	10,5	0,278	0,278
1,5	0,503	0,503	11	0,292	0,293
2	0,469	0,468	11.5	0,308	0,308
2,5	0,439	0,438	12	0,324	0,325
3	0,419	0,42	13	0,367	0,363
<b>3,5</b>	<b>0,408</b>	<b>0,408</b>	14	0,411	0,413
4	0,394	0,394	15	0,457	0,46
4,5	0,373	0,372	16	0,509	0,622
5	0,348	0,348	17	0,575	0,562
5,5	0,324	0,323	<b>18</b>	<b>0,626</b>	<b>0,611</b>
6	0,302	0,302	19	0,688	0,683
6,5	0,283	0,283	20	0,746	0,768
7	0,269	0,269	21	0,815	0,811
7,5	0,258	0,259	<b>21,5</b>	0,837	<b>0,82</b>
8	0,253	0,253	<b>22</b>	<b>0,851</b>	0,852
<b>8,8</b>	<b>0,252</b>	<b>0,252</b>	23	0,946	0,957
9,5	0,258	0,258	24	1,067	0,052
			<b>25</b>	1.088	<b>1,087</b>
			<b>25.5</b>	<b>1.072</b>	1,148
			<b>28</b>	1.383	<b>1,303</b>
			<b>30,5</b>	1.602	<b>1,144</b>
			<b>33 1/3</b>	<b>1,823</b>	<b>2,443</b>
			<b>37</b>	<b>1,304</b>	
			<b>40</b>	<b>3,451</b>	

**Tabla 3.3.** Respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión rectangulares 120 V 60/50 Hz (Fluctuación de tensión relativa de entrada  $\frac{\Delta V}{V} = V$  para una unidad de flicker instantáneo)[11]

### 3.1.3.2. Variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento

Según la norma IEC-61000-4-15 el medidor de flicker, con su clasificador, debe someterse a una serie de variaciones de tensión rectangulares. Para cada caso la severidad del flicker o  $P_{st}$  debe ser  $1,00 \pm 5\%$ .

Cambios rectangulares por minuto	Fluctuación de voltaje $\frac{\Delta V}{V}$	
	Lámpara 120V/50Hz	Lámpara 120V/60Hz
1	3,178	3,181
2	2,561	2,564
7	1,694	1,694
39	1,045	1,04
110	0,844	0,844
1620	0,545	0,548
4000	3,426	Prueba no requerida
4800	Prueba no requerida	4,837

**Tabla 3.4.** Especificaciones de ensayo para el clasificador del flickermetro [11]

Para el ajuste de frecuencia de la modulación ( $f_m$ ) se debe usar la ecuación 3.11:

$$f_m = \frac{CPM}{PP * 2} \quad (3.11)$$

Donde:

$f_m$ : Frecuencia de la moduladora.

CPM: Cambios rectangulares por minuto.

PP=Periodo de prueba. En nuestro caso tendrá una duración de 60 segundos.

### 3.1.3.3. Combinación de frecuencia y voltaje

En esta prueba la frecuencia  $f$  y la amplitud de la tensión de ensayo se modifican en intervalos de 4 segundos al paso por cero de la tensión. El valor  $P_{inst,max}$  observado debe ser 1,00 con una tolerancia de  $\pm 8\%$ .

Frecuencia del sistema (Hz)	Cambios de frecuencia (Hz)	Cambios de votaje U (V)
60	59,75	120
	60,25	119,266
50	49,75	120
	50,25	119,270

**Tabla 3.5.** Especificaciones de ensayo para una combinación de variaciones de frecuencia y de tensión para un sistema de 120 V.[11]

### 3.1.3.4. Ensayos para una tensión deformada con múltiples pasos por cero

La prueba de tensión deformada con múltiples pasos por cero consiste en agregar a la tensión fundamental  $U$  y los niveles de armónicos según la tabla 3.6. Todos los armónicos tienen un desfase de  $180^\circ$  con relación al fundamental de 60 Hz, esto quiere decir, que tienen un paso por cero hacia el negativo cuando el fundamental tiene un paso por cero hacia el positivo. Esta tensión deformada se modula de manera sinusoidal a 8,8 Hz con una amplitud según la tabla 3.7. El valor de  $P_{inst,max}$  observado debe ser 1,00 con una tolerancia  $\pm 8\%$ .

Orden del armónico $v$	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25	29	31
$U_{v-\%deU}$	5	6	5	1,5	3,5	3	2	1,76	1,41	1,27	1,06	0,97

**Tabla 3.6.** Especificaciones de ensayo para una tensión deformada con múltiples pasos por cero - Medidores de flicker de clase F1 - Sistema de 120 V y 60 Hz.[11]

Frecuencia del sistema(Hz)	Fluctuación de tensión %
50	0,321
60	0,321

**Tabla 3.7.** Tasa de modulación sinusoidal a 8.8 Hz para el ensayo de tensión deformada - Medidores de flicker de clase F1 - Sistema de 120 V.[11]

### 3.1.3.5. Ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos

Para este ensayo, la tensión de red con la frecuencia del sistema debe modularse superponiendo dos tensiones con frecuencias que estén separadas 10 Hz, como se muestra en la tabla 3.8. Las dos tensiones de modulación deben tener la amplitud relativa ( $U_i=U$ ) que es especificada en la tabla 3.8; esta amplitud relativa se encuentra en su valor RMS por lo que es necesario hallar la misma en sus valores pico con la finalidad de comprobar el medidor de flicker. Las frecuencias de modulación  $f_v$  y  $f_i$  del par de frecuencias ( $f_v, f_i = f_v - 10$  Hz) se incrementan para establecer el ancho de banda máximo del medidor de flicker. La frecuencia más elevada  $f_{v,max}$  para la que  $P_{inst,max}$  es 1,00 con una tolerancia  $\pm 8\%$  es el ancho de banda de entrada del medidor de flicker.  $f_{v,max}$  debe ser al menos 450 Hz. Los pares de frecuencia pueden aumentarse en escalones de 50 Hz (60 Hz para redes de 60 Hz) para este ensayo, comenzando por las frecuencias mínimas especificadas en la tabla 3.8.

Frecuencia del sistema Hz	$(\frac{f_i}{f_v})$ Hz	$(\frac{U_i}{U})$ %
60	170/180	4,126
50	140/150	4,126

**Tabla 3.8.** Especificaciones de ensayo para los armónicos con una banda lateral - Medidores de flicker de clase F1 - Sistema de 120 V. [11]

### 3.1.3.6. Ensayo para saltos de fase

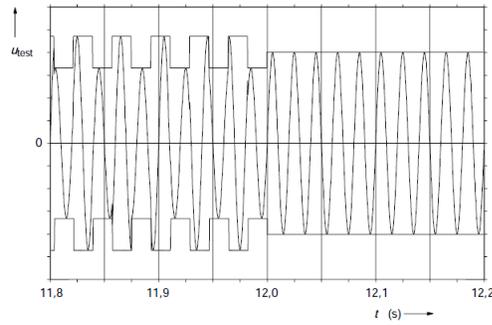
Este ensayo consiste en una secuencia de saltos de fases. Cada salto de fase debe producirse al paso por cero positivo tras 1 min, 3 min, 5 min, 7 min y 9 min ( $\pm 10$  s) después del comienzo de un período de observación de 10 min. Los ensayos deben repetirse para los ángulos de salto de fase  $\Delta\beta = +30^\circ$ ,  $\Delta\beta = -30^\circ$ ,  $\Delta\beta = +45^\circ$  y  $\Delta\beta = -45^\circ$ . El valor de  $P_{st}$  observado debe ser 1,00 en 10 min debe corresponder a la tabla 4.9. con una tolerancia de  $\pm 5\%$  o de  $\pm 0,05$  la que sea mayor. El tiempo de transición para cada salto de fase debe ser inferior a 0,5 ms.[11]

Frecuencia del sistema (Hz)	Ángulo de salto de fase $\Delta\beta$	$P_{st}$
60	$\pm 30$	0,587
	$\pm 45$	0,681
50	$\pm 30$	0,706
	$\pm 45$	0,819

**Tabla 3.9.** Especificaciones de ensayo para saltos de fase - Medidores de flicker clase F1 - sistema de 120 V.[11]

### 3.1.3.7. Ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20%

En esta prueba la tensión  $U$  se modula rectangularmente a una frecuencia de 28 Hz y con un ciclo de utilización de 12/60 (20%). Esto significa que, en un período de 60 s, el tiempo agregado durante el que la tensión de la señal permanece en un nivel es de 12 s, mientras que el tiempo agregado en el otro nivel es de 48 s. El tiempo de transición de una tensión a la siguiente debe ser inferior a 0.5 ms. El valor del  $P_{st}$  debe ser 1,00 con una tolerancia de  $\pm 5\%$ .[11]



**Figura 3.4.** Ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 %,  $f_m=28\text{Hz}$

[11]

Frecuencia del sistema	Fluctuación de tensión [%]
60	2,126
50	2,017

**Tabla 3.10.** Especificaciones para cambios rectangulares con ciclo de funcionamiento

### 3.2. Armónicos

*"Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales que tienen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la que el sistema de suministro está diseñado para funcionar (por ejemplo 50 Hz o 60 Hz)".[7]*

Los sistemas de energía eléctrica deben ser diseñados no sólo para corrientes y tensiones sinusoidales, sino también considerando cargas no lineales y cargas de conmutación electrónica. En los últimos tiempos ha existido un aumento del tipo de carga que introduce contaminación armónica, es decir, cargas que distorsionan las formas de onda de corriente y tensión, que crean resonancias, cargas que aumentan las pérdidas del sistema y en reducir la vida útil de los equipos eléctricos.[4]

Los armónicos en sistemas de potencia se originan debido a diversas operaciones, por ejemplo:

- Equipos con control de fase y alta potencia.
- Rectificadores no controlados, especialmente con suavizado capacitivo (por ejemplo: televisores, convertidores de frecuencia, y lámparas con balasto).

### 3.2.1. Modelo matemático de armónicos

El matemático francés J. B. J. Fourier (1758-1830) demostró que funciones arbitrarias podrían ser representadas por una serie infinita de senoidales relacionadas entre si armónicamente.[4]

Una señal periódica se puede representar mediante la serie de Fourier, esta serie tiene la siguiente expresión:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (c_k \text{sen}(\frac{k}{N} \omega_1 t + \varphi_k)) \quad (3.12)$$

Esta es la representación usada para el desarrollo de la serie de Fourier, donde según la norma IEC-61000-4-7,2009 se facilita la medición de ángulos al observar el cruce por cero.

$$Con = \begin{cases} c_0 = \frac{1}{T_N} \int_0^{T_N} f(t) dt. \\ a_k = \frac{2}{T_N} \int_0^{T_N} f(t) \cdot \cos(\frac{k\omega_1 t}{N}) dt. \\ b_k = \frac{2}{T_N} \int_0^{T_N} f(t) \cdot \sin(\frac{k\omega_1 t}{N}) dt. \end{cases} \quad (3.13)$$

$$y = \begin{cases} c_k = |b_k + ja_k| = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ Y_{C,k} = \frac{c_k}{\sqrt{2}} \\ \varphi_k = \pi + \arctan\left(\frac{a_k}{b_k}\right) \quad \text{si } b_k < 0 & \varphi_k = \arctan\left(\frac{a_k}{b_k}\right) \quad \text{si } b_k > 0 \\ \varphi_k = \frac{\pi}{2} \quad \text{si } b_k = 0 \quad \text{y } a_k > 0 & \varphi_k = \frac{-\pi}{2} \quad \text{si } b_k = 0 \quad \text{y } a_k < 0 \\ \varphi_k = 0 \quad \text{si } |b_k| \leq \varepsilon \quad \text{y } |a_k| \leq \varepsilon \\ \text{Con } \varepsilon = 0,05\% \quad U_{nom} \quad \text{y } \varepsilon = 0,05\% \quad I_{nom} \\ \text{o } \varepsilon = 0,15\% \quad U_{nom} \quad \text{y } \varepsilon = 0,15\% \quad I_{nom}. \end{cases} \quad (3.14)$$

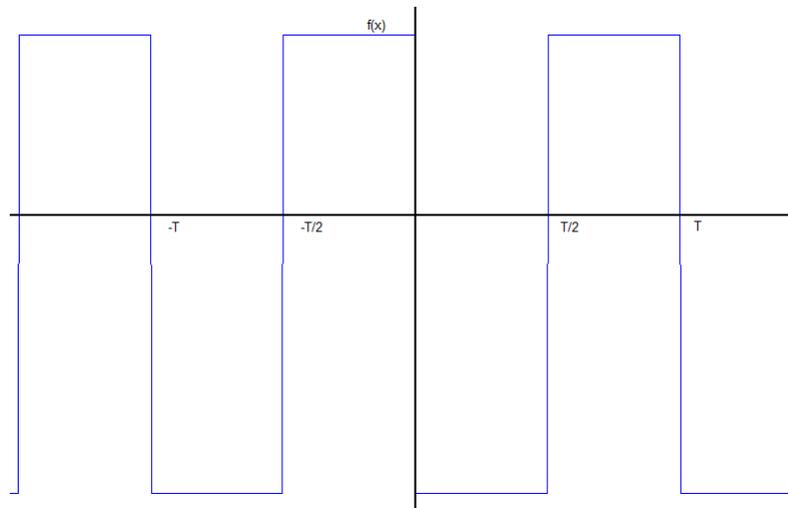
Donde en las ecuaciones anteriores ...

$\omega_1$ : Es la frecuencia angular de la fundamental ( $\omega_1 = 2\pi f_{H,1}$ ).  $T_N$ : Ancho de ventana de tiempo, es ese lapso de tiempo de la función sobre la que la transformada de Fourier es ejecutada.  $c_0$ : Componente d.c.  $c_k$ : Es la amplitud de la componente con frecuencia  $f_{C,k} = \frac{k}{N} f_{H,1}$ .  $Y_{C,k}$ : Es el valor r.m.s. de la componente  $C_k$ .  $f_{H,1}$ : Es la frecuencia fundamental del sistema de energía.  $k$ : Es el orden de la componente espectral relacionada con la resolución de la frecuencia ( $f_{C,1} = \frac{1}{T_N}$ ).  $N$ : Es el numero de periodos fundamentales dentro del ancho de ventana.  $\varphi_k$ : Es el angulo de desfase de la línea espectral  $k$ .

### 3.2.1.1. Espectro armónico

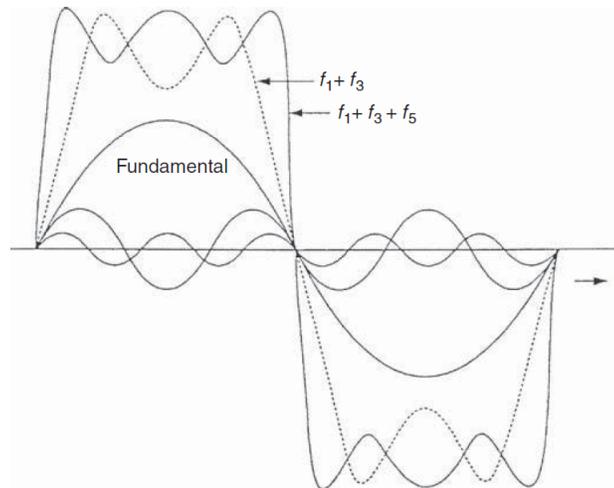
A manera de ejemplo se tiene que la serie de Fourier de una onda cuadrada es (Figura 3.5 ):

$$f(t) = \frac{4 \cdot A}{\pi} \cdot \left( \frac{\sin \cdot \omega \cdot t}{1} + \frac{\sin(3 \cdot \omega \cdot t)}{3} + \frac{\sin(5 \cdot \omega \cdot t)}{5} + \dots \right) \quad (3.15)$$



**Figura 3.5.** Señal de onda cuadrada

Donde  $A$  es la amplitud de la función. La magnitud del armónico  $n$  es  $1/n$ , cuando el fundamental se expresa en por unidad. Las componentes armónicas en tiempo de la onda cuadrada se muestra  $n$  en la figura 3.6, y los armónicos como un porcentaje de la magnitud de la fundamental, es decir, el espectro armónico se muestra en la figura 3.7. Un espectro armónico indica la magnitud relativa de los armónicos con respecto a la fundamental. [4]



**Figura 3.6.** Onda cuadrada con sus componentes armónicos [4]

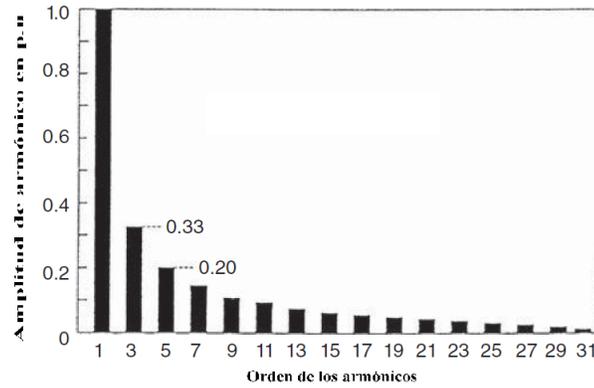


Figura 3.7. Espectro armónico de la figura 3.7 [4]

### 3.2.2. Tasa de distorsión armónica (THD)

Relación del valor r.m.s. de la suma de todas las componentes armónicas ( $Y_{H,h}$ ) hasta un orden específico ( $h_{max}$ ) para el valor eficaz de la componente fundamental ( $Y_{H,1}$ ).

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{max}} Y_{H,h}^2}{Y_{H,1}^2}} \quad (3.16)$$

#### 3.2.2.1. Frecuencia armónica ( $f_{H,h}$ )

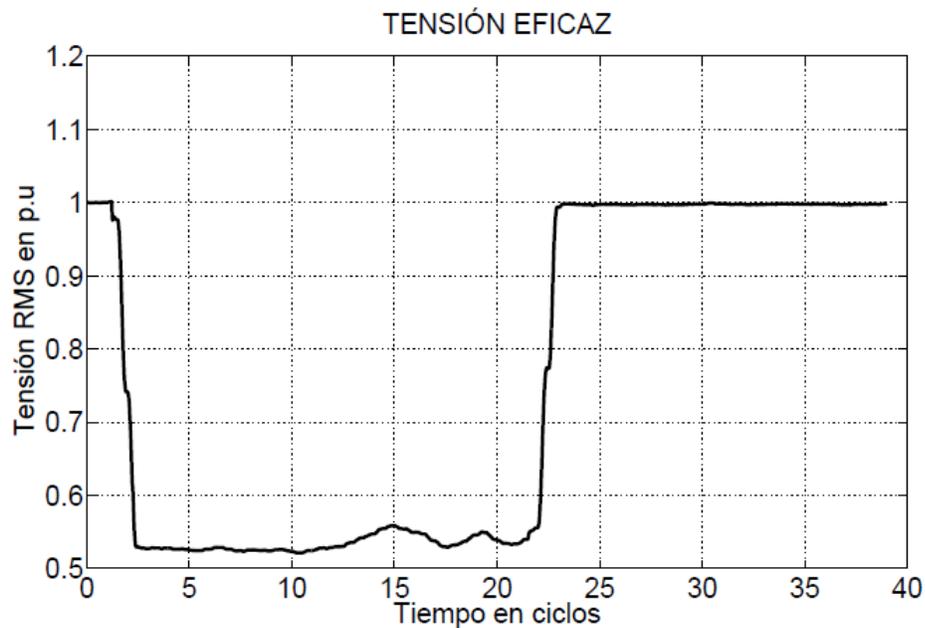
Es la frecuencia que es múltiplo de la frecuencia fundamental del sistema de potencia. ( $f_{H,h} = h \cdot f_{H,1}$ )

#### 3.2.2.2. Orden del armónico (h)

Relación de una frecuencia armónica de la frecuencia fundamental del sistema de potencia.

### 3.3. Huecos de tensión

Es una disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90 % y el 10 % de la tensión de alimentación  $U_c$ , seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura de 10 ms a 1 minuto. Las variaciones de tensión que no reducen su tensión de alimentación a un valor inferior al 90 % no se consideran como huecos de tensión ya que este es el rango para variaciones lentas de tensión (debido a los cambios de carga graduales) y fluctuaciones de tensión debidas a cambios rápidos y repetitivos de la carga .[21]

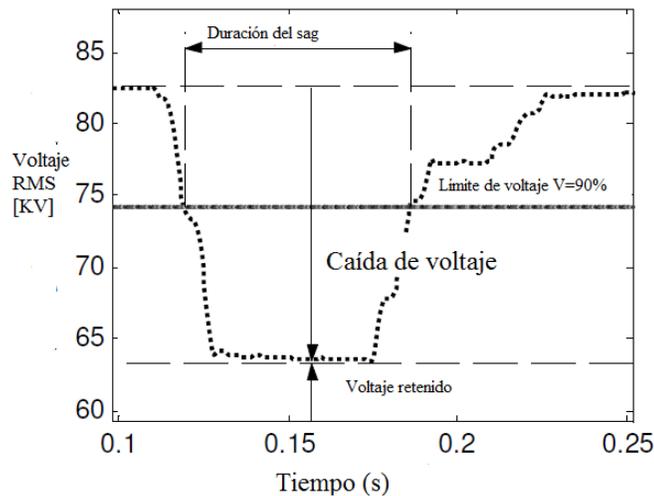


**Figura 3.8.** Hueco de tensión monofásico (Forma de onda rectangular, duración 20 ciclos y magnitud del hueco de 0,52 p.u. [20])

### 3.3.1. Caracterización de los huecos de tensión

#### 3.3.1.1. Magnitud y duración

Un hueco de tensión cuya amplitud es constante durante su duración puede ser caracterizado por dos valores, Amplitud( $\Delta U$ ) y duración ( $\Delta T$ ). La amplitud de los huecos de tensión estará definida como la diferencia entre el voltaje durante el hueco de tensión y el voltaje nominal del sistema. La amplitud es expresada como un porcentaje del voltaje nominal. Las duraciones menores de medio de ciclo no se considerarán debido a que los cambios de voltaje de esta duración son una característica de una red de distribución AC; variaciones de tensión ocasionales con duración menor a medio ciclo son considerados como los transitorios. Es esencial entender que un cierto número de huecos de tensión no se pueden evitar en las redes de suministro y que para la mayoría de los equipos es normal aceptar el riesgo de un número limitado de operaciones incorrectas debido a este tipo de perturbación.[7]



**Figura 3.9.** Hueco de tensión magnitud y duración. La detección de límite( $V=90\%$ ) es representado). [14]

### 3.3.2. Clasificación de los huecos de tensión

Se pueden clasificar los huecos de tensión de acuerdo a la forma de la secuencia de valores eficaces de tensión. En este sentido se puede hablar de huecos de tensión rectangulares y huecos de tensión no rectangulares. [1]. Los huecos de tensión originados por fallas de red son considerados rectangulares mientras que los originados por saturación de transformador y el arranque de motores de inducción son considerados no rectangulares.[20]

#### 3.3.2.1. Huecos de tensión rectangulares

Dentro de esta clasificación se encuentra los huecos de tensión originados por fallas de red, entre ellos se puede observar los originados por falla de red monoestado y multiestado.

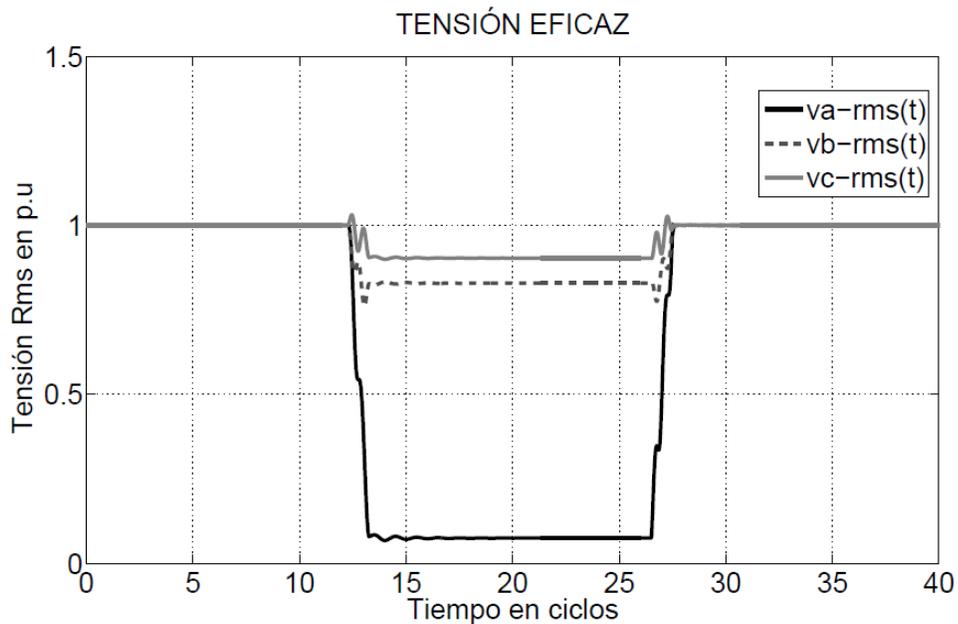
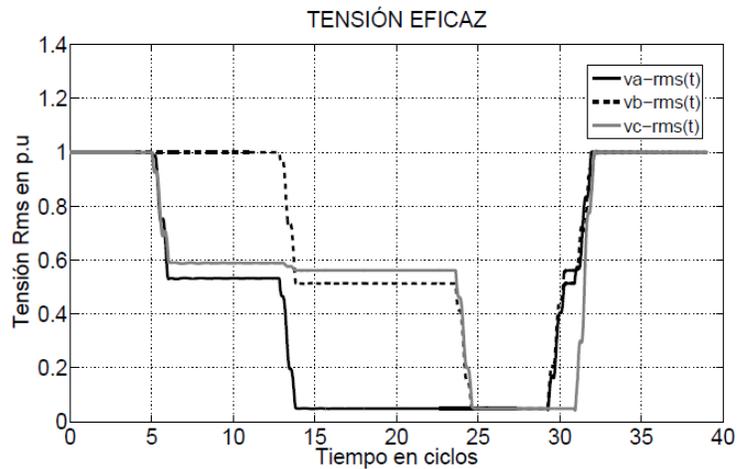


Figura 3.10. Hueco de tensión con sistema de puesta a tierra.[13]

Las fallas de red provocan grandes flujos de corriente y por consiguiente

importantes caídas de tensión que son experimentadas por los usuarios conectados a la red de energía eléctrica. De acuerdo a la característica de simetría de la falla, el hueco de tensión puede ser clasificado como balanceado o desbalanceado. Por ejemplo, una falla trifásica provoca un hueco de tensión simétrico o balanceado y una falla desbalanceada provoca un hueco de tensión asimétrico o desbalanceado.

Los huecos de tensión multiestado son originados por fallas en la red, debido a que un hueco de tensión presenta diferentes magnitudes o estados de falla antes de la recuperación de la tensión a su valor nominal. Este comportamiento obedece típicamente a los cambios de la configuración del sistemas de protección operan o también a los cambios en la naturaleza de la falla.

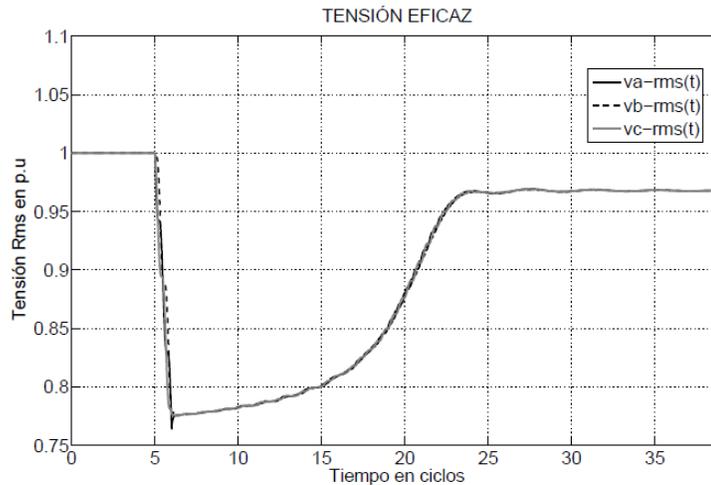


**Figura 3.11.** Hueco de tensión multiestado.[20]

### 3.3.2.2. Huecos de tensión no rectangulares

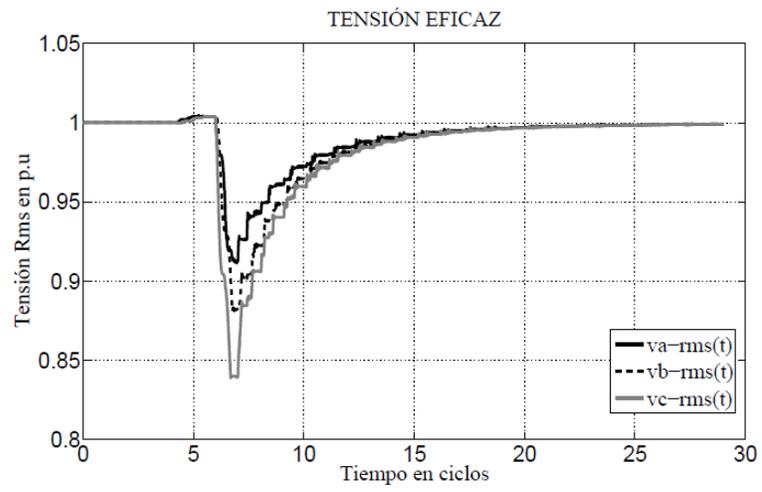
Dentro de esta clasificación se encuentran los huecos de tensión originados por el arranque de motores de inducción y la energización de transformadores, tal como se describe a continuación.

Durante el arranque de un motor de inducción, éste demanda grandes corrientes cuyas magnitudes se encuentran alrededor de 5 veces la corriente nominal y con bajo factor de potencia. La duración del hueco de tensión está determinada por la inercia de la máquina ya que una vez alcance el estado estable, la corriente habrá disminuido significativamente respecto a su estado inicial de arranque, provocando que el hueco de tensión desaparezca.



**Figura 3.12.** Hueco de tensión originado por arranque de motor de inducción.[20]

Durante la energización de un transformador se presentan transitorios en el flujo magnético del transformador, originándose elevadas corrientes de magnetización en el transformador. En la figura 3.13 se muestra un hueco de tensión originado por la energización de un transformador. [20]



**Figura 3.13.** Huevo de tensión originado por energizar un transformador.[20]

## CAPÍTULO IV

### MARCO METODOLÓGICO

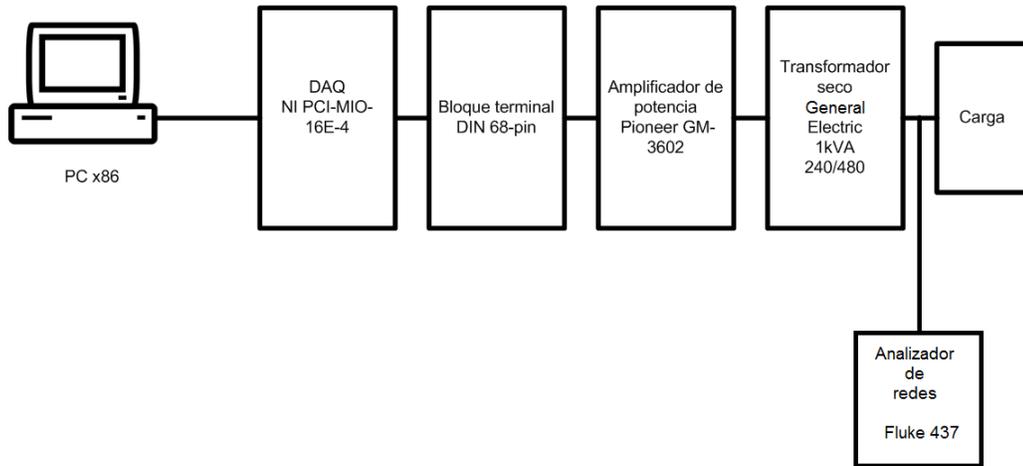
#### 4.1. Esquema del sistema desarrollado

En este capítulo se presenta el esquema del generador de eventos de calidad de energía mostrado en la figura 4.1. Una tarjeta de adquisición de datos modelo NI PCI-MIO-16E-4 y un amplificador de potencia clase B Pioneer GM-3602 son usados para sintetizar las señales generadas. Para el control y edición de los eventos de calidad de energía se utiliza un computador con un sistema operativo x86 ya que es el único compatible con los drivers de la tarjeta de adquisición. Se simuló los eventos de calidad de energía utilizando el software Matlab®Simulink®, el resultado de estas simulaciones será necesario para realizar verificaciones de las señales antes de compilarlas a la tarjeta de adquisición de datos.

El montaje implementado se presenta en la figura 4.2, en el cual se observan todos los equipos utilizados incluyendo el analizador de redes Fluke 437, lámpara incandescente de 25W, transformador monofásico, amplificador de audio Pioneer GM-3602 alimentado por un cargador de baterías.

##### 4.1.1. Computador de escritorio-Sistema operativo Windows XP y Matlab-Simulink

Se utilizó un computador con sistema operativo Windows XP x86 Pentium 4 con memoria RAM de 1Gb, en el cual se desarrollaron los programas mediante el software Matlab®Simulink®, Version 2010a.



**Figura 4.1.** Generador de eventos de calidad de energía

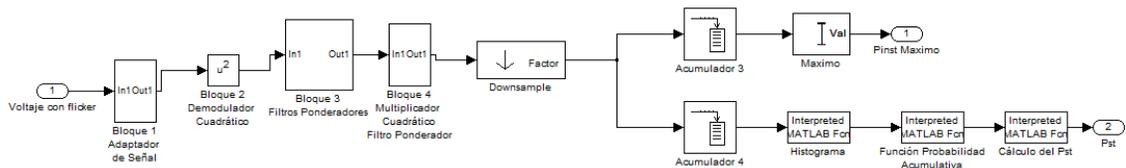
Entre las bibliotecas utilizadas se encuentra: Operaciones matemáticas (Bloques sumadores y multiplicadores), puertos y subsistemas (Entrada y salidas para submascaras del sistema de generación en tiempo real), ruteado de señales (Control mediante conmutación de la posición 1 y 2 entre señal no contaminada y señal modulada), fuentes (Señales trigonométricas y generadores de pulso para control de ciclo de trabajo) y funciones definidas por el usuario (Bloques utilizados para definir códigos). Adicionalmente se utilizarán bloques de retardo y switch controlados por temporizadores.

Para la medición del  $P_{st}$  y  $P_{inst}$  se utiliza un medidor de flicker genérico, presentado en el trabajo de Montoya [15]. El cual posee los 5 bloques que componen el medidor de flicker presentado en [11] (Figura 4.3).

El bloque utilizado para el cálculo del  $THDv$  fue Discrete Total Harmonic Distortion, con una frecuencia fundamental de 60Hz y un tiempo de muestro de 0.1 ms.



**Figura 4.2.** Montaje experimental del generador de eventos de calidad de energía



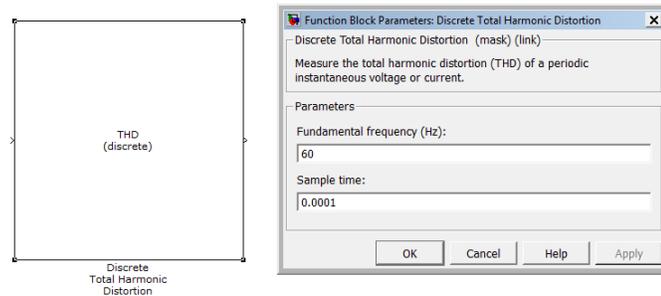
**Figura 4.3.** Bloques de simulink de medidor de flicker

#### 4.1.2. Tarjeta de adquisición de datos NI PCI-MIO-16E-4

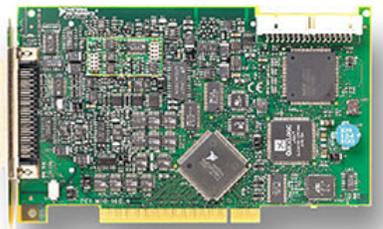
La tarjeta de adquisición NI PCI-MIO-16E-4 permite la generación de señales en tiempo real, posee 2 salidas de voltaje hacia los conectores E/S. La referencia y el rango para la salida analógica puede ser ajustada por software. La referencia puede ser tanto interna o externa, mientras que el rango puede ser bipolar o unipolar.

En este trabajo se utilizó la salida A0.0 (pin 22) con referencia externa en A0 EXT REF (pin 20) como se muestra en los terminales de la tarjeta de adquisición de la figura 4.6.

A la salida de la tarjeta es conectado un bloque terminal de 68 pines para así



**Figura 4.4.** Bloque simulink de Discrete Total Harmonic Distortion



**Figura 4.5.** Tarjeta de adquisición de datos NI PCI-MIO-16E-4

poder acceder a los terminales de la tarjeta a través de las borneras disponibles figura 4.7.

AI 8	34	68	AI 0
AI 1	33	67	AI GND
AI GND	32	66	AI 9
AI 10	31	65	AI 2
AI 3	30	64	AI GND
AI GND	29	63	AI 11
AI 4	28	62	AI SENSE
AI GND	27	61	AI 12
AI 13	26	60	AI 5
AI 6	25	59	AI GND
AI GND	24	58	AI 14
AI 15	23	57	AI 7
AO 0	22	56	AI GND
AO 1	21	55	AO GND
AO EXT REF	20	54	AO GND
PD.4	19	53	D GND
D GND	18	52	P0.0
PD.1	17	51	P0.5
P0.6	16	50	D GND
D GND	15	49	P0.2
+5 V	14	48	P0.7
D GND	13	47	P0.3
D GND	12	46	AI HOLD COMP
PFI 0/AI START TRIG	11	45	EXT STROBE
PFI 1/AI REF TRIG	10	44	D GND
D GND	9	43	PFI 2/AI CONV CLK
+5 V	8	42	PFI 3/CTR 1 SRC
D GND	7	41	PFI 4/CTR 1 GATE
PFI 5/AO SAMP CLK	6	40	CTR 1 OUT
PFI 6/AO START TRIG	5	39	D GND
D GND	4	38	PFI 7/AI SAMP CLK
PFI 9/CTR 0 GATE	3	37	PFI 8/CTR 0 SRC
CTR 0 OUT	2	36	D GND
FREQ OUT	1	35	D GND

**Figura 4.6.** Terminales de tarjeta de adquisición de datos NI PCI-MIO-16E-4.

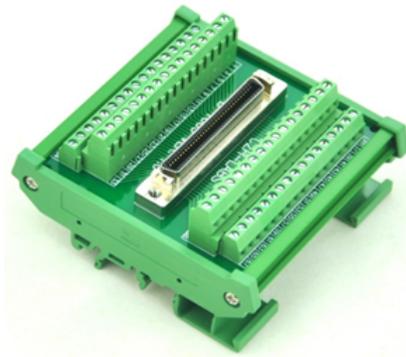
#### 4.1.2.1. Verificación de funcionamiento

Para validar el funcionamiento de la tarjeta y que la misma pudiera ser utilizada para generar la señales de de eventos de calidad de energía en tiempo real se realizaron las siguientes pruebas:

1. Prueba de comunicación a través del driver de la tarjeta.
2. Generación de forma de ondas con un valor constante y una senoidal.
3. Generación de forma de ondas con eventos de calidad de energía.

#### 4.1.3. Amplificador de potencia Pioneer GM-3602

El amplificador de potencia Pioneer GM-3602 tiene dos funciones; la primera es la de servir de aislamiento entre el circuito de control y de potencia, y la segunda



**Figura 4.7.** Bloque terminal DIN 68-pin

de amplificar la señal proveniente del la tarjeta de adquisición de datos; el mismo cuenta con filtro pasa abajo con frecuencia de corte 80 Hz.

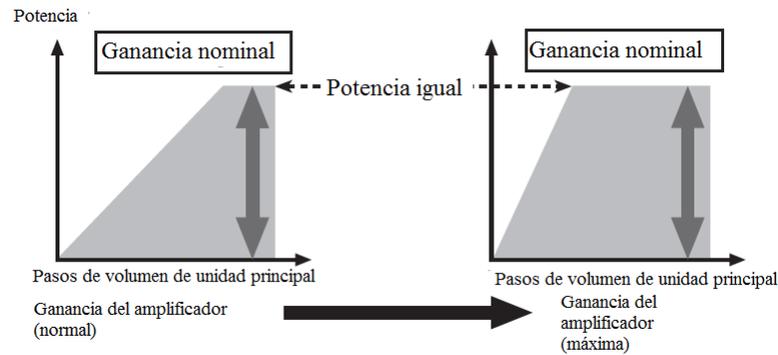
La señal entrada en el terminal RCA la cual permite un control en los pasos de ganancia y cuya señal de entrada no debe superar los 6.5 VAC ya que saturara al amplificador obteniéndose ruido a la salida. La figura 4.10 muestra el comportamiento de la potencia del amplificador contra los pasos de volumen.



**Figura 4.8.** Amplificador de potencia Pioneer GM-3602. Izquierda (vista trasera) y Derecha (vista frontal)

#### 4.1.3.1. Verificación de funcionamiento

Para validar el funcionamiento de la amplificador y que el mismo pueda ser utilizada para amplificar la señales de eventos de calidad de energía en tiempo real se realizaron las siguientes pruebas:



**Figura 4.9.** Relación entre ganancia y corriente de salida de la unidad principal

1. Se probó satisfactoriamente trabajando como amplificador de audio con salida monoaural( $4\Omega$ ) con altavoz( $6\Omega$ )
2. Se probó satisfactoriamente trabajando como amplificador de señales con generador de señales con ondas sinusoidales.
3. Se probó satisfactoriamente trabajando como amplificador de señales conectado a la tarjeta de adquisición de datos.

#### 4.1.4. Transformador seco General Electric 1kVA 240/480

Se utilizó un transformador seco disponible en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica "Melchor Centeno V." de la Universidad Central de Venezuela; cuyas características se presentan en la siguiente tabla.

El objetivo del transformador es amplificar el nivel de voltaje a los niveles nominales de la carga proveniente del amplificador de potencia.

<b>General Electric</b>		
<b>1 kVA</b>	<b>1 PH</b>	<b>50/60Hz</b>
<b>Baja 120/240</b>		
<b>Alta 240/480</b>		

**Tabla 4.1.** Características del transformador monofásico

## 4.2. Control de señales

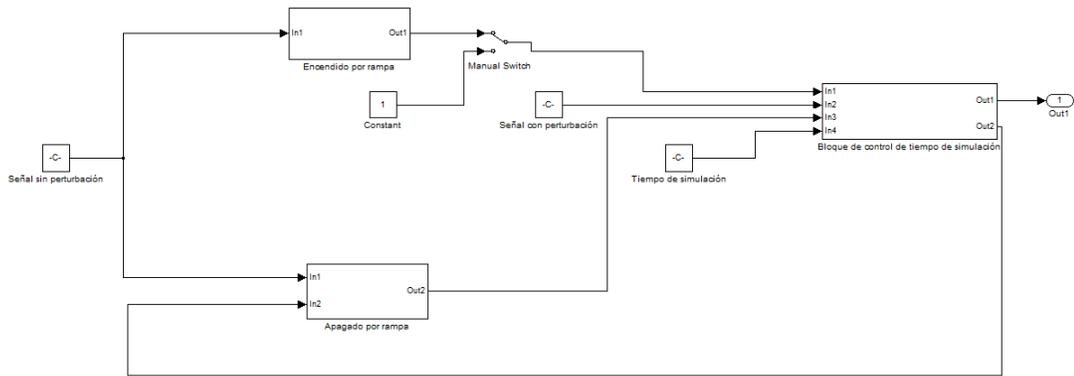
Para realizar la calibración del equipo, se desarrolla un programa capaz de alternar entre una señal no contaminada a una que se vea afectada por el evento seleccionado por el usuario; Esto con el objetivo de poder realizar ajustes en el hardware (Control de ganancia del amplificador de potencia) o en los equipos antes de iniciar las pruebas.

Esta permutación entre las dos señales se logra a través del bloque "Manual Switch" que ofrece Matlab® Simulink ®, el cual al presionarse permutará de la posición 1 a la 2. La posición 1 representa la señal no contaminada y la 2 es la que utiliza el bloque de calibración para asignar el tiempo de simulación.

Para disminuir el impacto del alza de tensión sobre la carga al encender el generador, esta señal no contaminada se modula con una función rampa con duración de 3 segundos hasta alcanzar el valor pico de la señal. Este mismo proceso se utiliza para finalizar la simulación y disminuir la señal progresivamente por 3 segundos.

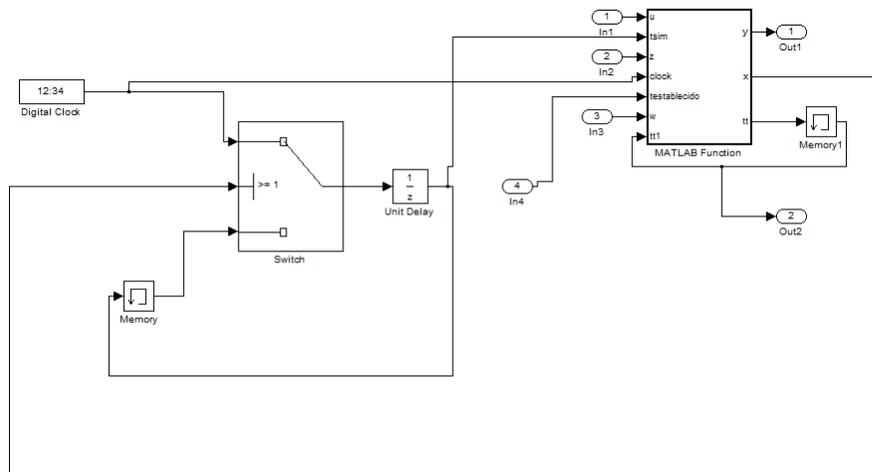
### 4.2.1. Bloque de tiempo de simulación

El propósito de este bloque es asignar un tiempo de simulación que sea independiente al que se establece en la casilla tiempo de simulación de simulink. Este bloque espera la bandera accionada por el "Manual Switch" para permutar a



**Figura 4.10.** Diagrama de bloques simulink para control de señales

la señal contaminada por el evento.



**Figura 4.11.** Bloque de tiempo de simulación

### 4.3. Analizador de redes Fluke 437

El instituto de ingeniería facilito el equipo analizador de redes fluke 437 para la validación de los modelos para este trabajo especial de grado, entre las aplicaciones usadas fuerón: Analizador de flicker ( $P_{st}$  y  $P_{inst}$ ), analizador de la tasa de distorsión armónica y fluctuaciones(Medidor de hueco de tensión). En este trabajo se referirá al analizador de redes Fluke 437 como Fluke simplemente.



**Figura 4.12.** Analizador de redes Fluke 437

# CAPÍTULO V

## SIMULACIONES DEL GENERADOR DE FLICKER

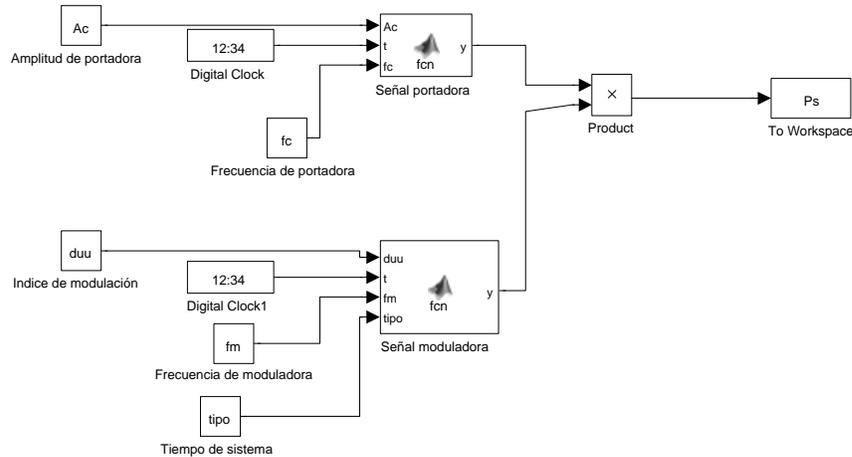
El modelo de simulación en el dominio del tiempo ha sido implementado en Matlab®Simulink®, con la finalidad de observar la forma de onda de tensión contaminada por el flicker y determinar el índice de severidad instantáneo ( $P_{inst}$ ) o índice de severidad a corto plazo ( $P_{st}$ ) para su posterior comparación con los valores medidos mediante el analizador de redes Fluke 437. Para determinar los índices de medida del flicker se usará un modelo simulink del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 desarrollado por el Montoya [15].

Las fluctuaciones asociadas al flicker se suelen modelar mediante una modulación de amplitud AM. En la tabla 3.1 del capítulo III, se presentan diferentes señales contaminadas con flicker para las pruebas del flickermetro del estándar IEC-61000-4-15. En este capítulo, las siglas *duu* hacen referencia al índice de modulación ( $\frac{\Delta V}{V}$ ).

### 5.1. Cambios de voltaje sinusoidales/rectangulares

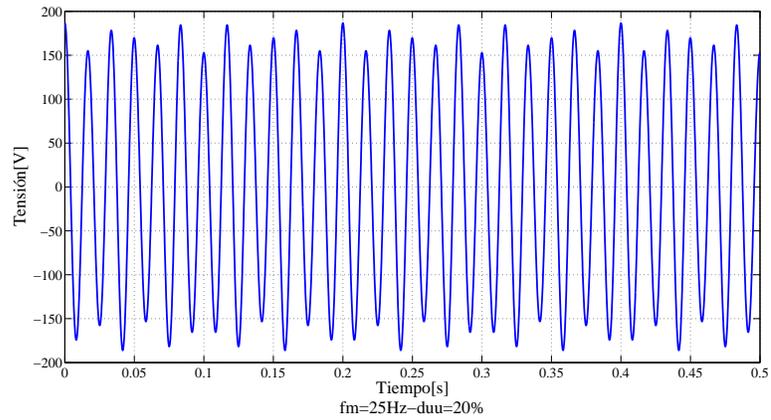
Esta prueba, contenida en el estándar IEC-61000-4-15, permite evaluar la sensación instantánea de flicker del flickermetro ante cambios de voltajes sinusoidales/rectangulares (Figura 5.1). En el modelo simulink de esta prueba se tiene como entradas la frecuencia portadora ( $f_c$ ), la frecuencia moduladora ( $f_m$ ), la amplitud relativa de la variación de tensión ( $duu$ ) y el tipo de variación de tensión ( $tipo$ ). Al seleccionar el tipo de variación de tensión ya sea tipo 0 (Modulación

sinusoidal) o tipo 1 (Modulación rectangular) se realizara una modulación AM convencional que simulara el comportamiento de las fluctuaciones asociadas al flicker. Según la norma para esta prueba el máximo de la sensación instantánea de flicker ( $P_{inst,max}$ ) debe ser igual a 1,00 con una tolerancia de  $\pm 8 \%$ .



**Figura 5.1.** Modelo de cambios de voltaje sinusoidales/rectangulares

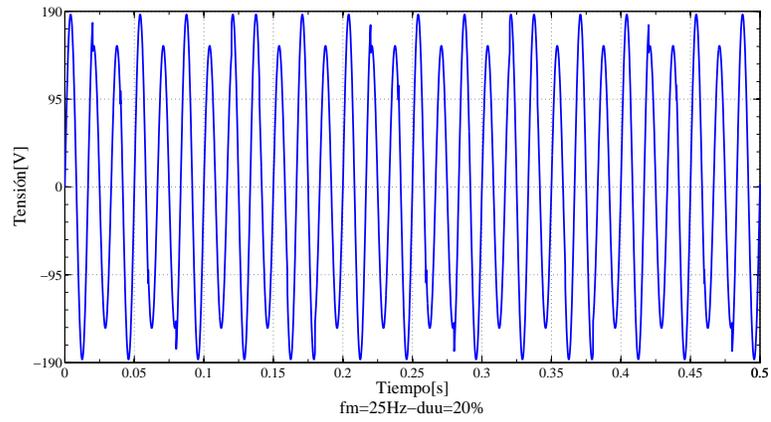
Para facilitar la visualización del efecto flicker se utilizó una señal de 120 V para ambas modulaciones (sinusoidal y rectangular). En las señales contaminadas con flicker de las figuras 5.2 y 5.3 se emplearon señales senoidales y rectangulares con coeficiente de modulación del 20% y frecuencia igual a 25 Hz. Las pruebas obligatorias a niveles de 120 V y 60Hz del del medidor de flicker arrojaron como resultados los presentados en las tablas 5.1 y 5.2 para la modulación sinusoidal y rectangular respectivamente. Como puede observarse todos los valores entraron dentro del limite del error establecido de la norma [11].



**Figura 5.2.** Cambios de voltaje sinusoidales a 60 Hz

Frecuencia moduladora [Hz]	Pinst;max simulado
0,5	1,001
1,5	1,002
8,8	1,000
20	0,996
25	1,000
33 1/3	1,057
40	1,192

**Tabla 5.1.** Resultados de simulaciones del Pinst-Ensayo cambios de voltaje sinusoidales a 60 Hz



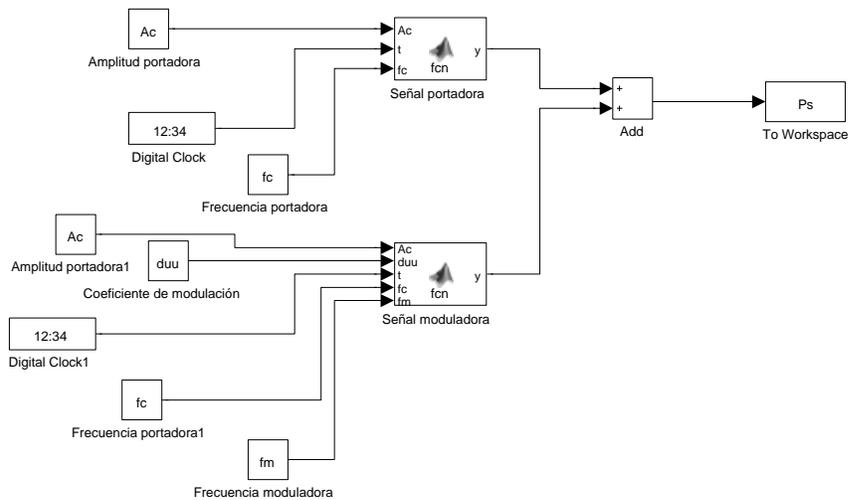
**Figura 5.3.** Cambios de voltaje rectangulares a 60 Hz

Frecuencia moduladora [Hz]	Pinst;max simulado
0,5	1,000
3,5	1,001
8,8	1,000
18	0,998
22	0,993
25,5	1,000
33 1/3	1,049
37	1,040
40	1,202

**Tabla 5.2.** Resultados de simulaciones del Pinst-Ensayo cambios de voltaje rectangular a 60 Hz

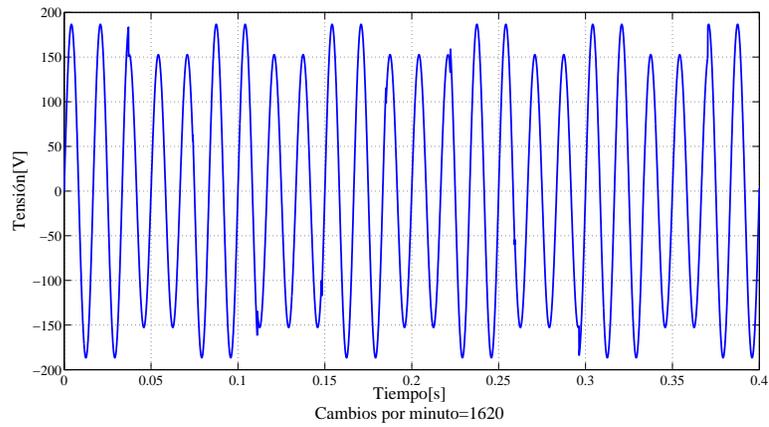
## 5.2. Variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento

En el estándar IEC 61000-4-15 se definen una serie de ensayos para la prueba del clasificador y algoritmos de evaluación estadística (Ver tabla 3.4). Para la generación de las señales con variaciones de tensión rectangulares de esta prueba (Figura 5.4) se realiza una modulación rectangular sobre la señal portadora. En el modelo simulink de las señales de esta prueba (Figura 5.4) se asignan como entradas la frecuencia de la portadora ( $f_c$ ) y el coeficiente de modulación ( $duu$ ) de la variación de tensión flicker. Los cambios por minutos, definidos en la prueba, vienen determinados por la frecuencia moduladora, se debe tener en cuenta que la frecuencia de la moduladora viene dada por la ecuación 3.11 y su valor dependerá del numero de cambios por minutos deseados en la variación de tensión del flicker. El valor rms de la portadora  $Ac$  es 120 V y la frecuencia de la moduladora  $f_m$  se calcula en función de los cambios por minuto deseados. Para cada caso de esta prueba, la norma establece una severidad del flicker o  $P_{st}$  de  $1,00 \pm 5\%$ .



**Figura 5.4.** Modelo de variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento

A manera de ilustración, en la Figura 5.5, se muestra una señal contaminada con flicker con una variación de tensión rectangular del 20 %. En la tabla 5.3 se puede observar que los resultados medidos con el modelo simulink del flickermetro, están en el rango del error de un  $\pm 5\%$ .



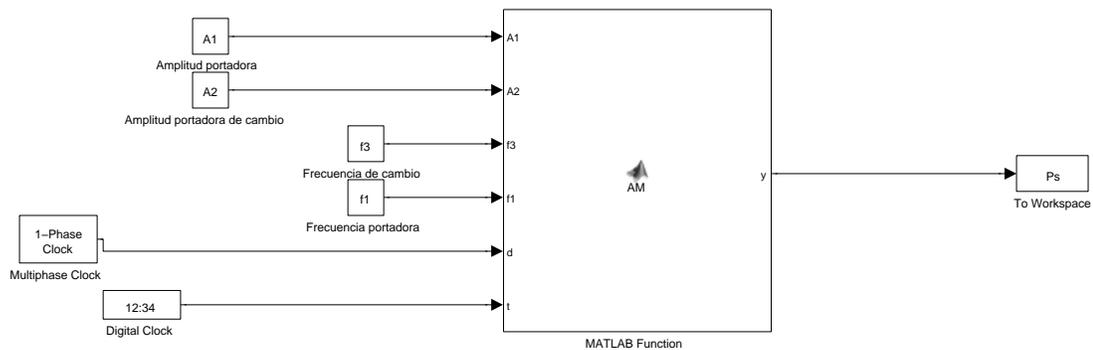
**Figura 5.5.** Variaciones rectangulares a 60 Hz

Cambios por minuto	$P_{st}$ simulado
1	1,07
2	0,9995
7	0,9994
39	0,9965
110	0,9998
1620	0,9996
4800	1,094

**Tabla 5.3.** Resultados de simulaciones del Pst-Variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento

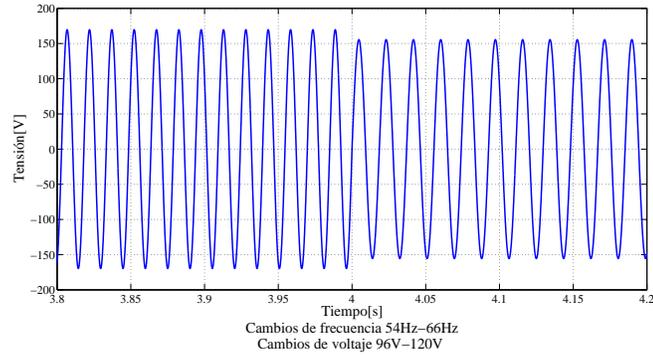
### 5.3. Combinación de frecuencia y voltaje

Para esta prueba, establecida en la norma IEC-61000-4-15, se varió la frecuencia de la portadora y la amplitud de la tensión según la tabla 3.5 capítulo III. Estos valores se modifican en intervalos de 4 segundos en el cruce por cero de la tensión. En el modelo simulink que genera la señal de prueba (Figura 5.6) se tiene como entradas la frecuencia de la portadora ( $f_1$ ), la frecuencia de cambio ( $f_3$ ), la amplitud de la portadora ( $A_1$ ) y la amplitud de cambio ( $A_2$ ). El valor  $P_{inst,max}$  observado debe ser 1,00 con una tolerancia de  $\pm 8\%$ .



**Figura 5.6.** Modelo de combinación de frecuencia y voltaje

Para efectos ilustrativos se presenta en la Figura 5.7 una señal donde se varía la tensión entre 120 V y 96 V y la frecuencia entre 54 Hz y 66 Hz respectivamente.

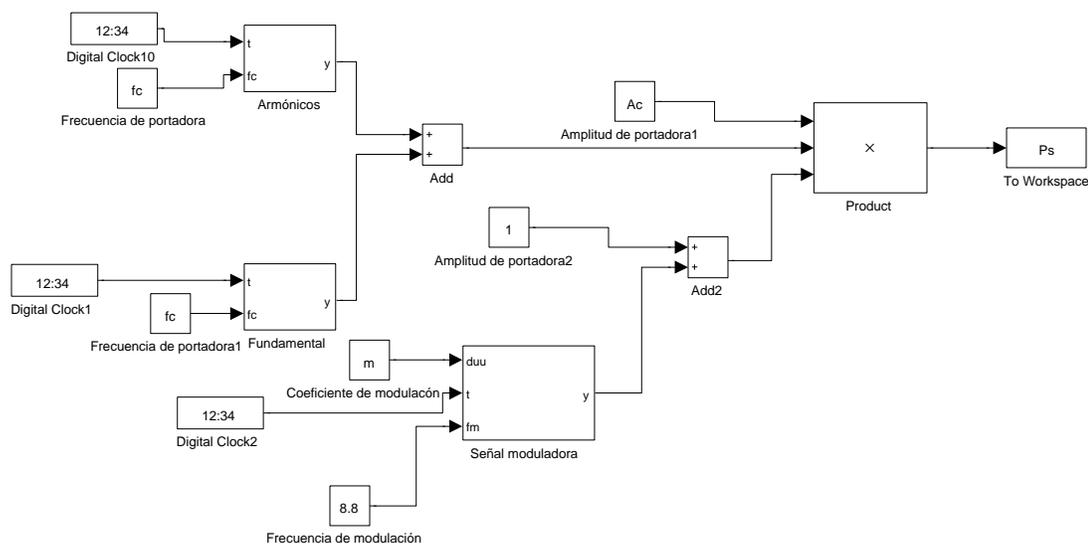


**Figura 5.7.** Combinaciones de frecuencia y voltaje a 60 Hz

En este ensayo, se ha obtenido para la sensación instantánea de flicker  $P_{inst}$ , el valor 1,0074 medido con el modelo simulink del flickermetro de Montoya [15].

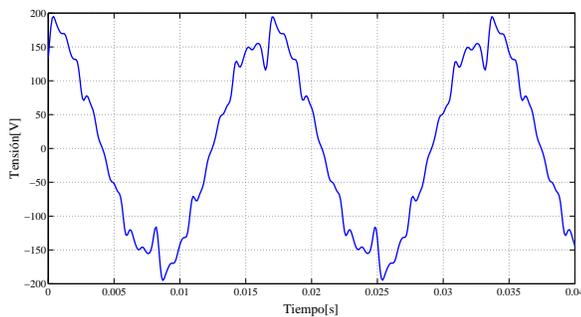
#### 5.4. Ensayos para una tensión deformada con múltiples pasos por cero

Esta prueba, establecida en el estándar IEC-61000-4-15, establece una modulación sinusoidal a 8.8 Hz sobre una señal contaminada por armónicos, deformando la señal con múltiples pasos por cero. En el modelo simulink de la señal correspondiente a esta prueba (Figura 5.8) se presentan 3 bloques. En el bloque principal se genera la señal fundamental, en el bloque secundario se suman los armónicos según la tabla 3.6 y en el tercer bloque se realiza la modulación senoidal flicker. Según la norma, el valor del  $P_{inst,max}$  observado debe ser 1,00 con una tolerancia  $\pm 8\%$ .



**Figura 5.8.** Modelo de ensayos para una tensión deformada con múltiples pasos por cero

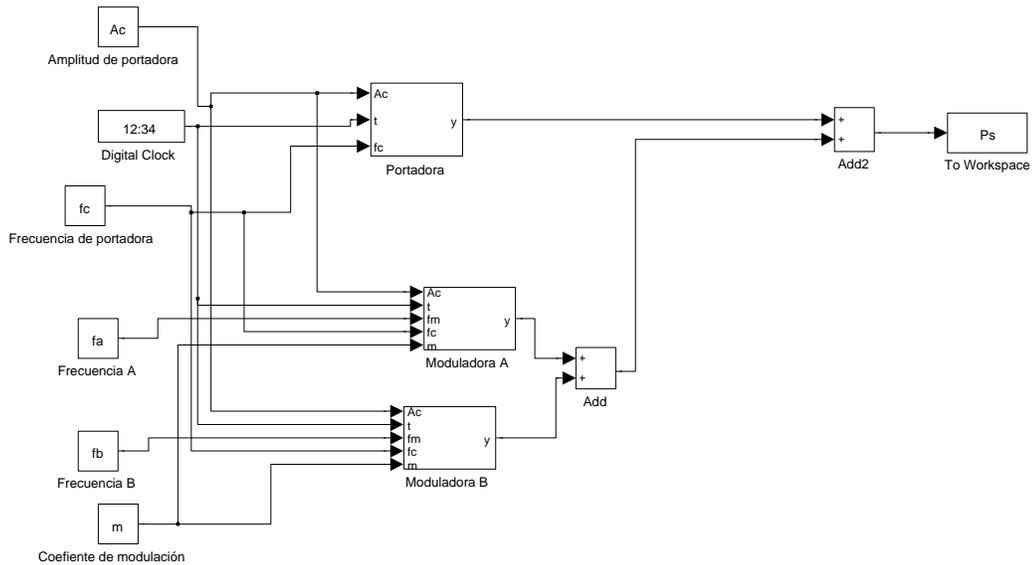
El valor de  $P_{inst}$  medido con el modelo simulink del medidor de flicker es 0,9999, es decir, el valor está dentro de lo esperado. Se puede observar en la Figura 5.9 la señal distorsionada con los armónicos definidos en la prueba.



**Figura 5.9.** Tensión deformada con múltiples pasos por cero a 60Hz

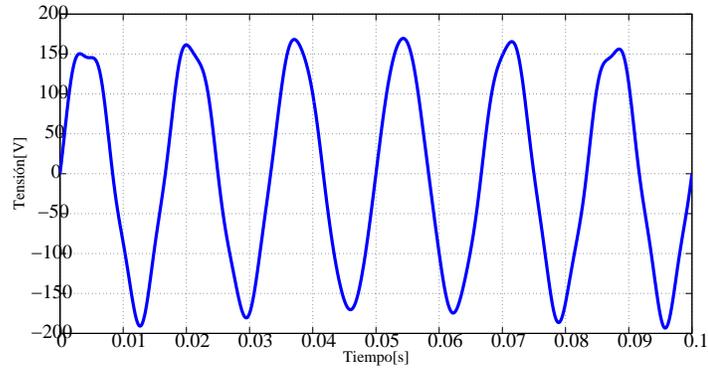
### 5.5. Ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos

En esta prueba, definida en el estándar IEC-61000-4-15, se modula la tensión sinusoidal de 60 Hz superponiendo dos tensiones con frecuencias separadas 10 Hz, según la tabla 3.8. Las dos tensiones de modulación tienen una amplitud relativa ( $U_i=U$ ) que es especificada en la tabla 3.8. Las frecuencias de modulación  $f_v$  y  $f_i$  del par de frecuencias ( $f_v, f_i = f_v - 10$  Hz) se incrementan para establecer el ancho de banda máximo del medidor de flicker. La frecuencia más elevada  $f_{v,max}$  para la que  $P_{inst,max}$  es 1,00 con una tolerancia  $\pm 8\%$  es el ancho de banda de entrada del medidor de flicker,  $f_{v,max}$  el cual debe ser al menos 450 Hz. En el modelo simulink de generación de la señal de prueba de la Figura 5.10, las frecuencia  $f_v$  y  $f_i$ , serán referidas como  $fa$  y  $fb$  respectivamente. En este ensayo como puede observarse



**Figura 5.10.** Modelo de ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos

en la tabla 5.4, el resultados esta dentro del esperado  $P_{inst,max}$  de  $1 \pm 8 \%$ , tal como esta establecido en la norma. Como podemos observar en la Figura 5.11 la señal esta deformada por la presencia de los armónicos e interarmónicos. Para efectos ilustrativos se muestra la gráfica de la Figura 5.11 que posee un indice de modulación del 20 %



**Figura 5.11.** Ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos 60 Hz

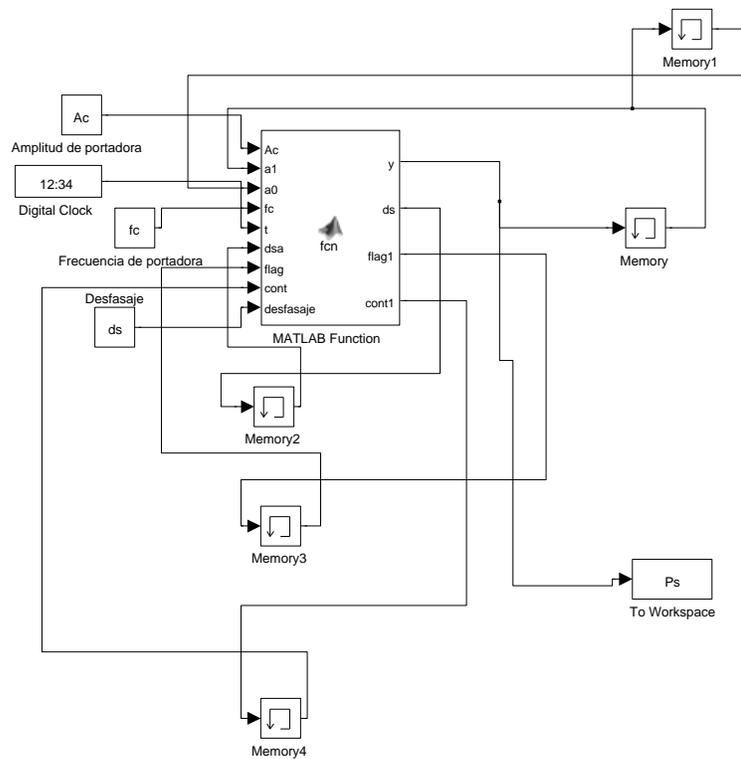
Pares de frecuencia [Hz]	$P_{inst,max}$ simulación
170-180	1,0005
230-240	0,9878
290-300	0,9889
350-360	0,9881
410-420	0,9883

**Tabla 5.4.** Resultados de simulaciones del Pinst-Ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos a 60Hz

## 5.6. Ensayo para saltos de fase

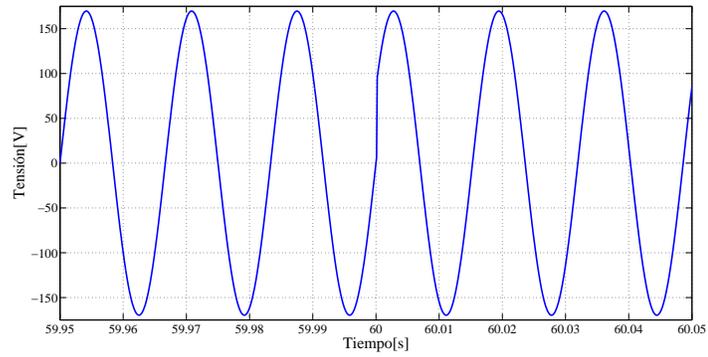
En esta prueba, establecida en la norma IEC-61000-4-15, la señal a probar es una senoidal de frecuencia 60 Hz y amplitud 120 V con un secuencia de saltos de

fases. Cada salto de fase se produce al paso por cruce cero positivo tras 1 min, 3 min, 5 min, 7 min y 9 min ( $\pm 10$  s) después del comienzo de un período de observación de 10 min. La norma establece la ocurrencia de saltos de fase a  $\Delta\beta = +30^\circ$ ,  $\Delta\beta = -30^\circ$ ,  $\Delta\beta = +45^\circ$  y  $\Delta\beta = -45^\circ$ . El código desarrollado en simulink (Figura 5.12) compara el estado anterior al salto de fase y el siguiente para cumplir con la condición de que el salto siempre ocurra cuando la señal sin desfase tenga un cruce por cero según los intervalos establecidos por la prueba descrita en la norma [11]. Finalmente el modelo simulink tiene como entradas el desfase y la frecuencia de la portadora. Según la norma, el valor del  $P_{st}$  observado en 10 min debe corresponder con los valores de la tabla 3.9. con una tolerancia de  $\pm 5\%$  o de  $\pm 0.05\%$  la que sea mayor.

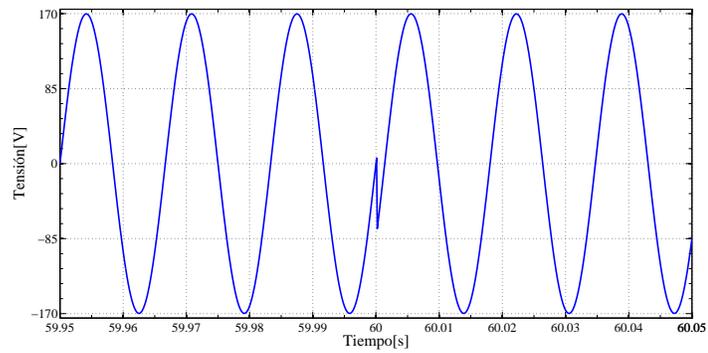


**Figura 5.12.** Modelo de ensayos para saltos de fase

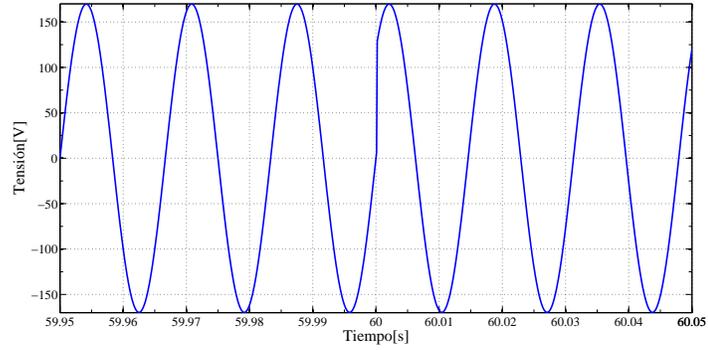
En las gráficas 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16 se presentan los saltos de fase al minuto de iniciada la prueba. Como puede observarse en la tabla 5.5 , el  $P_{st}$  medido para cada salto de fase correspondiente esta entre los márgenes de error establecidos en la norma.



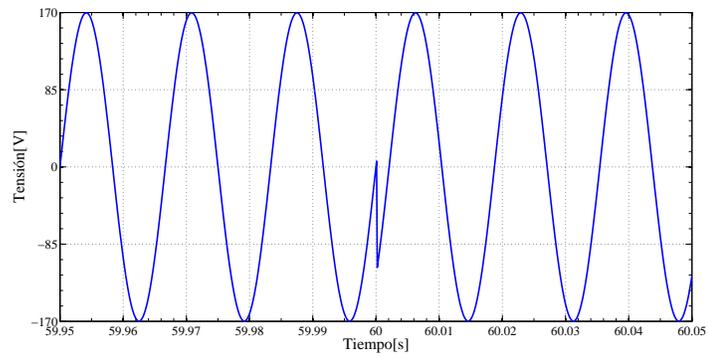
**Figura 5.13.** Ensayo de salto de fase 60 Hz y  $30^\circ$



**Figura 5.14.** Ensayo de salto de fase 60 Hz y  $-30^\circ$



**Figura 5.15.** Ensayo de salto de fase 60 Hz y  $45^\circ$



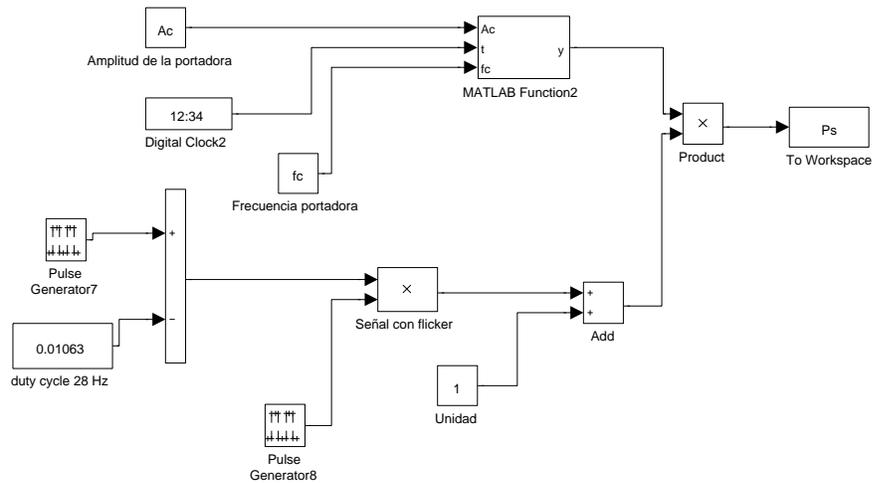
**Figura 5.16.** Ensayo de salto de fase 60 Hz y  $-45^\circ$

Salto de fase	Pst Simulado
30	0,5688
-30	0,6110
45	0,6241
-45	0,7433

**Tabla 5.5.** Resultados de simulaciones del Pst-Ensayo para saltos de fase a 60Hz

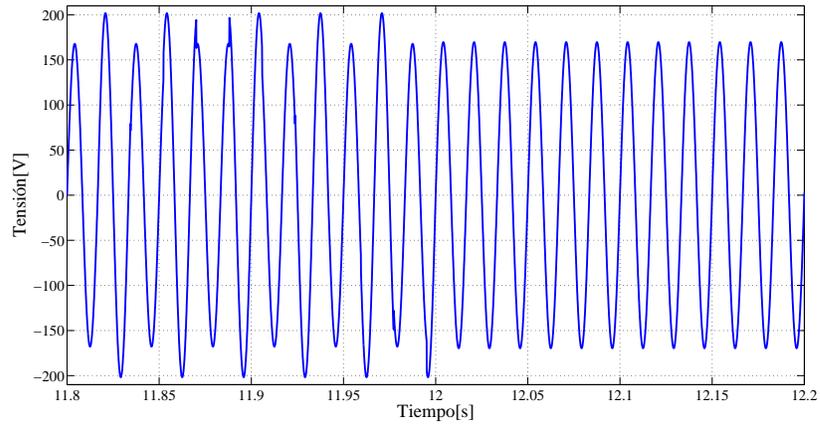
### 5.7. Ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 %

En esta prueba de la norma IEC-61000-4-15, se modula rectangularmente a una frecuencia de 28 Hz y con un ciclo de utilización de 12/60 (20 %) una portadora de 120 V y 60 Hz. Esto significa que, en un período de 60 s, el tiempo agregado durante en el que la tensión de la señal permanece en un nivel es de 12 s, mientras que el tiempo agregado en el otro nivel es de 48 s. El modelo Simulink de la prueba (Figura 5.17) tiene la frecuencia portadora como entrada( $f_c$ ). El valor del  $P_{st}$  debe ser 1,00 con una tolerancia de  $\pm 5\%$ .



**Figura 5.17.** Modelo de ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 %

Para efectos ilustrativos la figura 5.18 utiliza un coeficiente de modulación del 20 %. El  $P_{st}$  medido con el modelo Simulink del flickermetro arroja el valor de 1,002, ubicado dentro del margen de error establecido.



**Figura 5.18.** Ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 % a 60Hz

## CAPÍTULO VI

### MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS GENERADOR DE FLICKER

En los montajes experimentales realizados con los equipos disponibles, se ha observado que para señales con una moduladora de flicker mayor a 20 Hz la tensión a la salida del transformador no alcanza los valores deseados de 120 V. Esto se debe principalmente a que el equipo de amplificación utilizado reduce la amplitud de la tensión de salida a medida que el ancho de banda de la señal de entrada aumenta.

En los resultados mostrados a continuación, se indican los valores medidos por el equipo medidor de flicker Fluke 437 con el valor de la tensión de trabajo alcanzada a la salida del transformador.

#### **6.1. Resultados cambios de voltaje sinusoidales/rectangulares**

En esta prueba se utilizó el analizador de redes comercial Fluke 437 que arroja como medida la sensación instantánea de flicker  $P_{inst}$  y se comparó con la medida realizada en la simulación mediante el modelo Simulink del flickermetro. En las tablas 6.1 y 6.2 se presentan los resultados de  $P_{inst}$  según la frecuencia de la moduladora para los ensayos obligatorios conforme a la norma [11].

Frecuencia moduladora	P <sub>inst</sub> ;min Experimental	P <sub>inst</sub> ;max Experimental	Nivel de tensión	P <sub>inst</sub> ;max Simulado	Error P <sub>inst</sub> ;max [%]
0,5	0,46	1	64	1,001	0,1
1,5	0,70	0,97	120	1,002	3,19
8,8	0,92	1	119,7	1,000	0
20	0,91	0,94	64,7	0,996	5,62
25	0,93	0,96	64,8	1,000	4
33 1/3	0,94	0,96	64,8	1,057	9,17
40	0,94	0,95	64,7	1,192	20

**Tabla 6.1.** Resultados del  $P_{inst}$ -Ensayo cambios de voltaje sinusoidales a 60 Hz. Pruebas obligatorias.

Se puede determinar de la tabla 6.1 que el error promedio porcentual es de 6.939 %, se tiene que en la medición del flicker con cambios de tensión de 40 Hz, se muestra un mayor error en la simulación con respecto al 8 % establecido por la norma, mientras que experimentalmente si se cumple con el limite establecido en la norma. Adicionalmente, para variaciones de tensión mayores a 20 Hz, la tensión a la salida del transformador no puede superar los 65 V. El índice contemplado en todas las pruebas experimentales de la tabla 6.1 están dentro de los valores establecidos en la norma.

Frecuencia moduladora	P <sub>inst</sub> ;min Experimental	P <sub>inst</sub> ;max Experimental	Nivel de tensión	P <sub>inst</sub> ;max Simulado	Error P <sub>inst</sub> ;max [%]
0,5	0,06	0,98	65	1,000	2
3,5	0,75	0,97	121,2	1,001	3,76
8,8	0,93	1,04	120,5	1,003	3,79
18	0,94	1,05	120,8	0,998	4,95
22	1,03	1,07	63,9	0,993	0,70
25,5	0,89	0,9	63,5	1,000	5
33 1/3	0,93	0,95	63,4	1,049	9,43
37	0,87	0,98	63,28	1,040	5,76
40	0,95	0,96	63,6	1,202	20,13

**Tabla 6.2.** Resultados del  $P_{inst}$ -Ensayo cambios de voltaje rectangulares a 60 Hz. Pruebas obligatorias.

Como se examinar en la tabla 6.2, para el caso de cambios de tensión rectangulares, la medición del  $P_{inst}$  se mantiene dentro de valores esperados a medida que se incrementa la frecuencia de la moduladora. Es decir, los índices de sensación instantánea de flicker contemplado en la tabla 6.2 están dentro de los valores permitidos en la norma.

## 6.2. Variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a las pruebas del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 de variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento. De las mismas se espera que ante los cambios rectangulares de la señal moduladora flicker que el  $P_{st}$  sea 1 con error del 5%.

Cambios por minuto	$P_{st}$ Experimental	$P_{st}$ Simulado	Nivel de tensión
1	1	1,07	119,8
2	0,99	0,9995	120
7	1	0,9994	121
39	0,98	0,9965	119,6
110	0,98	0,9998	119,9
1620	1	0,9996	58,67
4800	0,97	1,094	58,71

**Tabla 6.3.** Resultados  $P_{st}$  para variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento.

Se observa que la medición del  $P_{st}$  en la simulación presenta problemas para medir el flicker con 4800 cpm con el error permitido por la norma. Aún así, el error medio cometido en las simulaciones de las mediciones fue de 5.78%. Por otro lado, todos los resultados experimentales entran en el rango establecido por la norma.

### 6.3. Combinación de frecuencia y voltaje

En esta sección se indica el resultado correspondiente a las prueba del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 de combinación de frecuencia y voltaje. De las mismas se espera que ante los cambios frecuencia y voltaje de la señal contaminada por flicker el  $P_{inst}$  sea 1 con error del 8 %.

La tabla 6.4 muestra el resultado de la prueba realiza con el analizador de redes Fluke 437, junto con el de la simulación.

$P_{inst,min}$ Experimental	$P_{inst,max}$ Experimental	$P_{inst,min}$ Simulado	$P_{inst,max}$ Simulado	Nivel de tensión (V)
1,06	1,08	-	1,0074	119,7

**Tabla 6.4.** Resultados  $P_{inst}$  para combinación de voltaje y frecuencia a 60Hz.

En esta prueba tanto los valores medidos en la simulación como en el montaje experimental de la sensación instantánea de flicker  $P_{inst}$  están en el rango permitido por el estándar, es decir, el error permitido en la norma [11] para la prueba, fue menor del 8 % para la medición del  $P_{inst}$ .

### 6.4. Ensayos para una tensión deformada con múltiples pasos por cero

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a la prueba del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 de ensayos para una tensión deformada con múltiples pasos por cero. De la misma se espera que para la señal de tensión deformada el  $P_{inst}$  sea 1 con error del 8 %.

Como se aprecia en la tabla 6.6, tanto el error de la medición del  $P_{inst}$  simulado como el del montaje experimental tomada con el analizador de redes Fluke es como mucho el 5 %, es decir, el nivel de  $P_{inst}$  medido estuvo dentro de los limites

$P_{inst}$ experimental	$P_{inst}$ simulado	Nivel de tensión (V)
0,95	0,9999	41.3

**Tabla 6.5.** Resultados  $P_{inst}$  para ensayo para una tensión deformada con múltiples pasos por cero a 60 Hz

establecidos por la norma. La tensión de trabajo a la salida del transformador, sin saturar la salida del amplificador, fue de 41,3 V.

### 6.5. Ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos

En esta sección se indican los resultados correspondientes a las pruebas del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 de ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos. De las mismas se espera que ante los cambios rectangulares de la señal moduladora el  $P_{inst}$  sea 1 con error del 8 %.

Pares de frecuencia	$P_{inst}$ experimental	$P_{inst}$ simulado	Nivel de tensión (V)
170/180	1	1,005	53,12
230/240	0,92	0,9878	38.98
290/300	0,88	0,9889	28.99
350/360	0,86	0,9881	29
410/420	-	0,9883	29

**Tabla 6.6.** Resultados  $P_{inst}$  para ensayo de ancho de banda utilizando una modulación de banda lateral de armónicos y de interarmónicos a 60 Hz.

Esta prueba fue la que mayor diferencia de resultado arrojó respecto a lo estipulado en la norma, en este sentido, dos de los cinco ensayos cumplieron con la exigencia del 8 % de error. En este caso fue necesario calibrar los niveles de tensión en cada prueba por debajo de 120 V dado que el amplificador se saturaba, además, el analizador de redes presentó dificultades al trabajar con pares de frecuencias

superiores a 170/180 Hz, inclusive deja de entregar resultados para el último par de frecuencias de 410/420 Hz.

### 6.6. Ensayo para saltos de fase

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a las pruebas del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 de ensayo para saltos de fase. De las mismas se espera que ante los cambios rectangulares de la señal moduladora el  $P_{st}$  debe corresponder con los valores de la tabla 3.9 con error del 5 %.

Salto de fase	Estándar IEC 61000-4-15	Simulación	Experimental	Nivel de tensión (V)
30	0,587	0,5688	0,56	64,5
-30	0,587	0,6110	0,77	61,46
45	0,681	0,6241	0,62	60,14
-45	0,681	0,7433	0,79	59,31

**Tabla 6.7.** Resultados  $P_{st}$  para ensayo para saltos de fase a 60 Hz.

Al analizar los resultados de la tabla 6.7, puede contemplarse que para la medición realizada con el analizador de redes, solo para los saltos de fase de +30 y +45 cumplieron con los parámetros establecidos por la norma en el cual estos no deben superar un error del 5 %; Mientras que en los casos de -30 y -45 estos valores de  $P_{st}$  no entraron en los parámetros establecidos, esto se debe a armónicos que distorsionan la medición del  $P_{st}$  y que al ser estos cambios tan cercanos a cero afectan la medición.

### 6.7. Ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 %

En esta sección se indican los resultados correspondientes a las pruebas del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 de ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 %. De la misma se espera que ante

los cambios rectangulares de la señal moduladora con ciclo de trabajo del 20 % el  $P_{st}$  sea 1 con error del 5%.

Tanto en el resultado simulado como en el montaje experimental se obtuvieron resultados con errores menores al 2%, es decir, errores que satisfacen la norma [11]. La tensión de trabajo a la salida del transformador hubo que ajustarla a 30 V.

<b>Pst Experimental</b>	<b>Pst simulado</b>	<b>Nivel de tensión (V)</b>
<b>1,02</b>	<b>1,002</b>	<b>30</b>

**Tabla 6.8.** Resultados Pst para ensayo para variaciones de tensión rectangulares con un ciclo de utilización del 20 % a 60 Hz

# CAPÍTULO VII

## SIMULACIONES DEL GENERADOR DE ARMÓNICOS

El sistema implementado en Matlab®Simulink®, genera una señal senoidal contaminada con armónicos según lo definido por la ecuación 3.12 en el capítulo III. Los datos de entrada necesarios serán definidos en el entorno de Matlab para inicializar la generación por software y son: La frecuencia fundamental( $f$ ), el orden de armónicos( $vecn0$ ), amplitud de armónicos( $vecn1$ ) y el desfasaje con respecto a la fundamental ( $ds$ ). En la figura 7.1 se presenta el modelo mediante dos bloques principales. El primero contiene la suma de las señal con armónicos sin incluir la fundamental y un segundo bloque que incluye la fundamental. Posteriormente, el resultado de estos dos bloques se suman para así obtener el comportamiento de la señal contaminada.

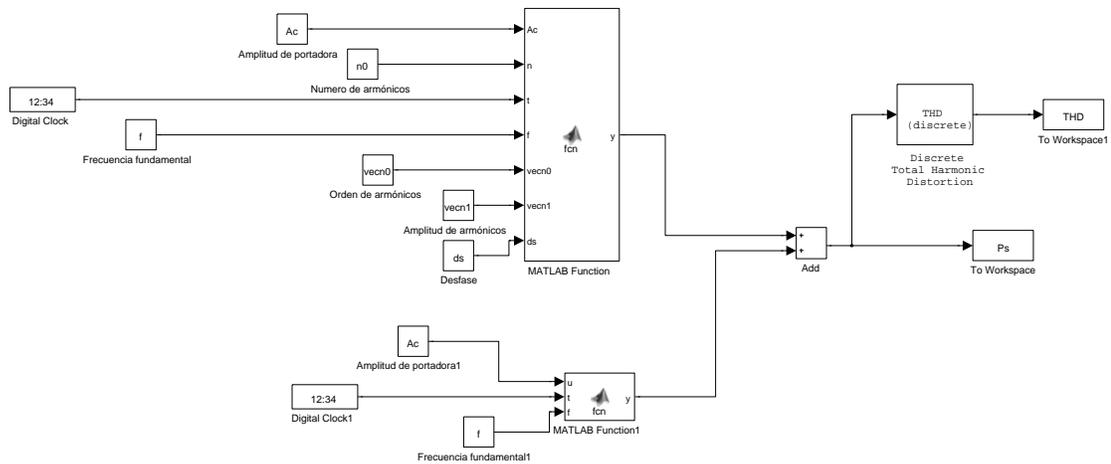


Figura 7.1. Modelo simulink de generador de armónicos

Se realizaron dos pruebas en el entorno de la simulación con diferente contaminación armónica. En la tabla 7.1, se muestra para cada prueba el valor de la distorsión armónica (THD<sub>v</sub>) medido por el bloque simulink respectivo.

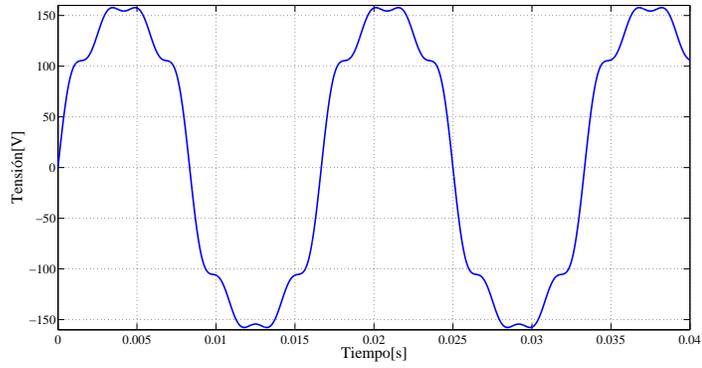
<b>Prueba</b>	<b>THD simulado [%]</b>
<b>1</b>	<b>15,82</b>
<b>2</b>	<b>31,45</b>

**Tabla 7.1.** Tasa de distorsión armónica para simulación la prueba 1

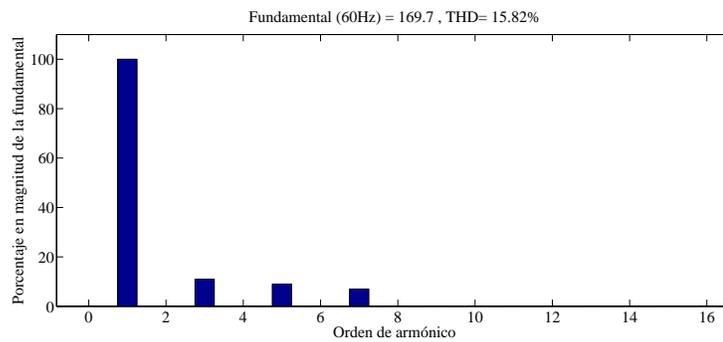
En la primera prueba se contamina la fundamental con 3 armónicos, definidos por su orden y amplitud según la tabla 7.2. En la gráfica 7.2 y 7.3 se presentan la forma de onda y el espectro de la señal respectivamente resultante de la prueba 1.

<b>Orden del armónico</b>	<b>Amplitud del armónico[%]</b>
<b>3</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>7</b>

**Tabla 7.2.** Orden de armónico y amplitud utilizado para simulación de la prueba 1



**Figura 7.2.** Señal contaminada con armónicos de la prueba 1

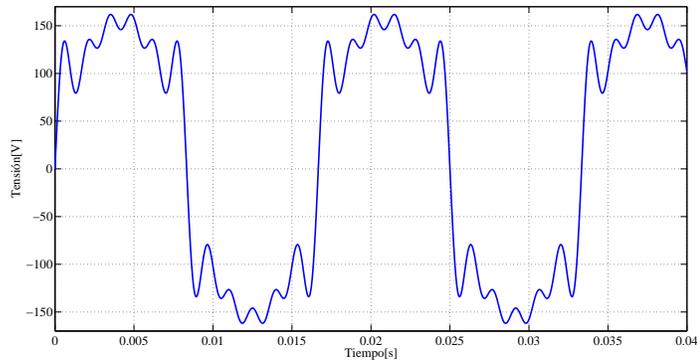


**Figura 7.3.** Señal contaminada con armónicos de la prueba 1-Análisis espectro armónico

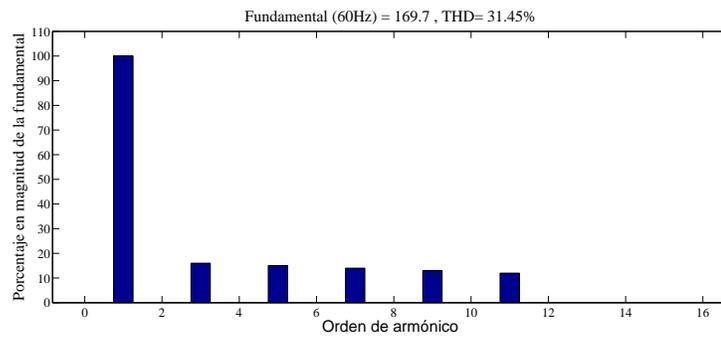
La segunda prueba se realiza con 5 armónicos, definidos por su orden y amplitud según la tabla 7.3. En la gráfica 7.4 y 7.5 se presentan la forma de onda y el espectro de la señal resultante de la prueba 2.

Orden del armónico	Amplitud del armónico [%]
<b>3</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>14</b>
<b>9</b>	<b>13</b>
<b>11</b>	<b>12</b>

**Tabla 7.3.** Orden de armónico y amplitud utilizado para simulación de la prueba 2



**Figura 7.4.** Señal contaminada con armónicos de la prueba 2



**Figura 7.5.** Prueba de generador de armónicos a 60Hz- Análisis espectro armónico

## CAPÍTULO VIII

### MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS GENERADOR DE ARMÓNICOS

Las dos pruebas realizadas en el entorno de simulación, descritas en el capítulo anterior, se realizaron en el montaje experimental a un nivel de tensión de 69 V a la salida del transformador. Esto con la finalidad de no saturar al amplificador dado que el mismo limita la amplitud de la señal a la salida cuando se trabaja con toda la gama de frecuencias disponibles. A pesar de que las mediciones se realizaron a un nivel de tensión reducido y no al nominal, las mismas son igualmente válidas ya que el cálculo del THD es un índice relativo calculado a través de un cociente de amplitudes armónicas.

#### 8.1. Resultados experimentales del generador de armónicos

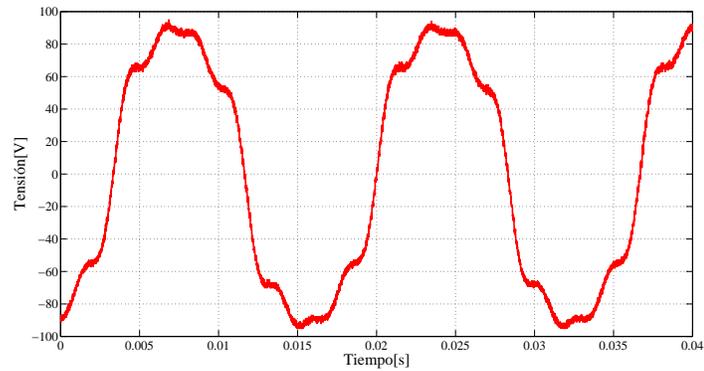
En la siguiente tabla 8.1 se presentan los resultados para la primera prueba de distorsión armónica. En la misma se indica el orden y la amplitud, mientras que en la tabla 8.2 se presenta el THD simulado y los valores de THD medidos mediante el analizador de redes Fluke 437.

Orden del armónico	Amplitud del armónico[%]
3	11
5	9
7	7

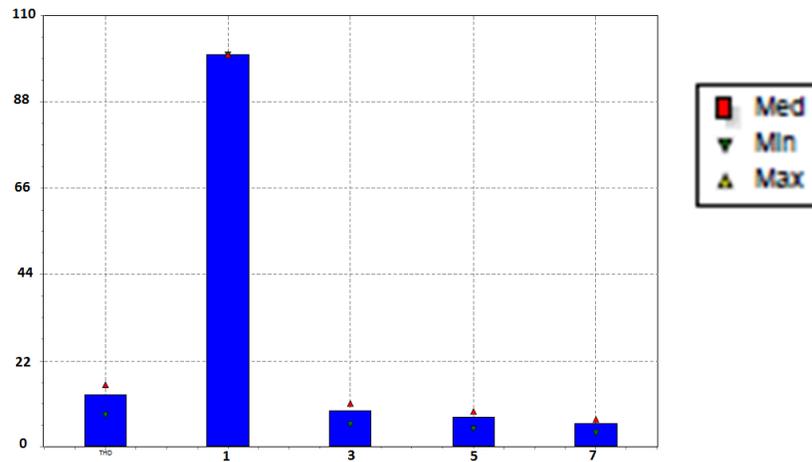
**Tabla 8.1.** Orden de armónico y amplitud utilizado para simulación de 60Hz

Simulación [%]	Fluke 437-Mínimo[%]	Fluke 437-Media[%]	Fluke 437-Máximo[%]
15,82	15,67	15,82	15,85

**Tabla 8.2.** THD de voltaje prueba 1



**Figura 8.1.** Prueba de generador de armónicos prueba 1- Análisis en tiempo



**Figura 8.2.** Prueba de generador de armónicos prueba 1- Análisis espectro armónico

La primera prueba se realiza con 3 armónicos sumados a la señal fundamental como se muestra en la tabla 8.1. Como se puede observar en las figuras 8.1 y 7.2, las formas de onda simuladas y generadas experimentalmente presentan un comportamiento similar.

Se puede observar además que el THD de voltaje máximo presentado por el Fluke 437 y el simulado guardan un error del 3% mientras que frente al mínimo de un 15%. También podemos observar en la figura 8.2 el análisis del espectro armónico, en el cual puede apreciarse que la amplitud de armónicos introducidas mediante software fue el mismo con respecto al de la simulación.

La segunda prueba es realizada con 5 armónicos. En la tabla 8.3 se presentan el orden y amplitud, mientras que en la tabla 8.4 se presenta el THD simulado y los valores de THD proporcionados por el analizador de redes Fluke 437.

<b>Orden del armónico</b>	<b>Amplitud del armónico[%]</b>
3	16
5	15
7	14
9	13
11	12

**Tabla 8.3.** Orden de armónico y amplitud utilizado para simulación de 60Hz

<b>Simulación [%]</b>	<b>Mínimo-Fluke 437[%]</b>	<b>Media-Fluke 437[%]</b>	<b>Máximo-Fluke 437[%]</b>
<b>31,46</b>	<b>30,56</b>	<b>31,29</b>	<b>31,45</b>

**Tabla 8.4.** THD de voltaje prueba 2

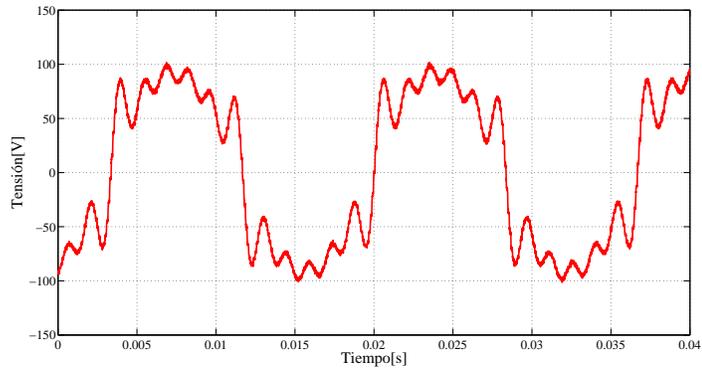


Figura 8.3. Prueba de generador de armónicos prueba 2-Análisis en tiempo

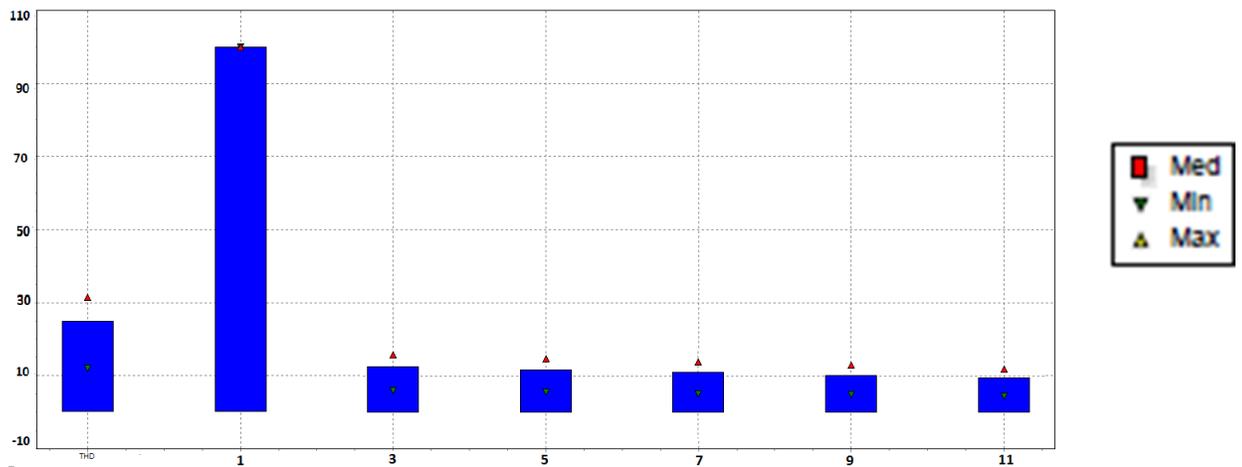


Figura 8.4. Prueba de generador de armónicos prueba 2- Análisis espectro armónico

Se puede observar que en la figura 8.3 la forma de onda generada por la segunda prueba. Podemos observar en la tabla 8.4 el mínimo, media y máximo del THD medidos mediante el Fluke 437. En la prueba se presenta un error en el THD máximo del 0.03 %. En la figura 8.4 se observa que la amplitud de los armónicos ingresados por software dio un valor cercano al mostrado en la figura 7.5.

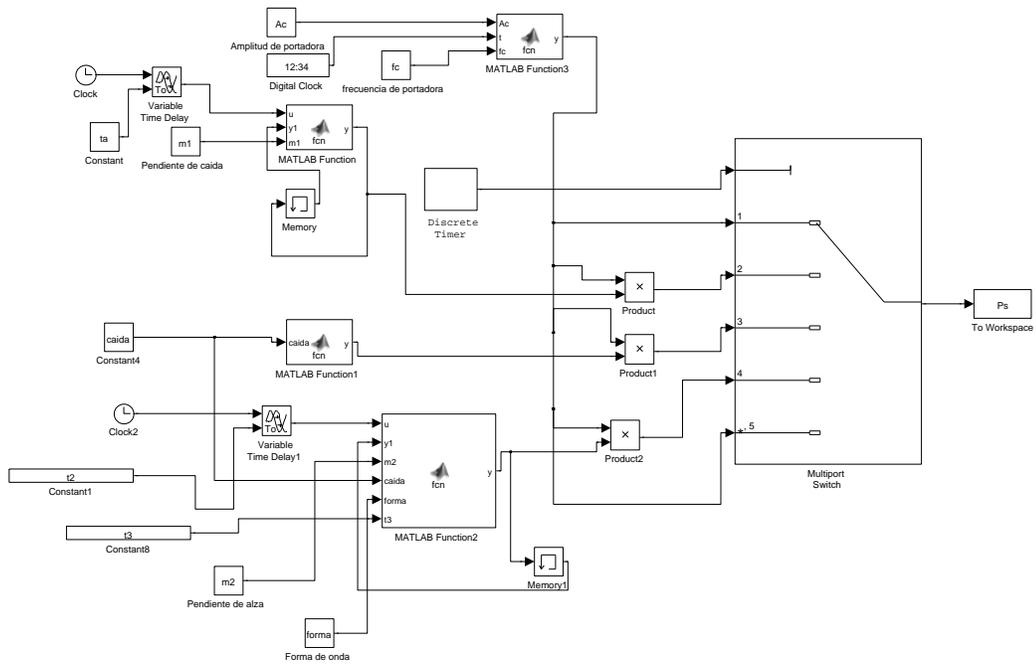
## CAPÍTULO IX

### SIMULACIONES DEL GENERADOR DE HUECOS DE TENSIÓN

El generador de huecos de tensión implementado en Matlab®Simulink®. simula el comportamiento de huecos de tensión a partir de un tiempo definido por el usuario. La generación de huecos posee 2 modos de operación: monoestado y multiestado. En el caso monoestado, se puede elegir entre las opciones: rectangular y no rectangular. La opción rectangular permite configurar una señal de comportamiento rectangular o configurar huecos no rectangulares, así como también permite simular los efectos de arranque de motores o por saturación de un transformador sobre una red monofásica residencial. Finalmente el modo multiestado permite establecer diferentes pasos para el voltaje retenido o tiempos de recuperación para un hueco de tensión en intervalos definidos.

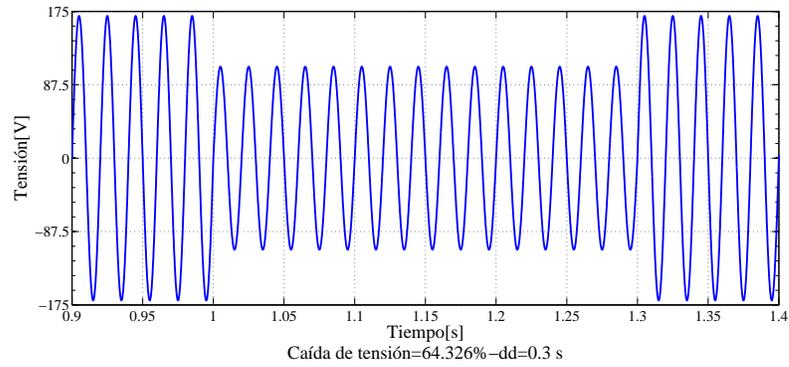
#### 9.1. Huecos de tensión monoestado

Este sistema permite la simulación de huecos de tensión rectangulares, no rectangulares, por arranque de motor y energización de transformadores. Entre sus variables de entrada encontramos (Figura 9.2): la frecuencia de la red, el porcentaje de voltaje retenido con respecto a su valor de tensión nominal, tiempo de caída, tiempo a voltaje reducido y tiempo de alza. Además, una vez definido el tiempo de simulación, se le permite al usuario determinar el tiempo de inicio de la falla.

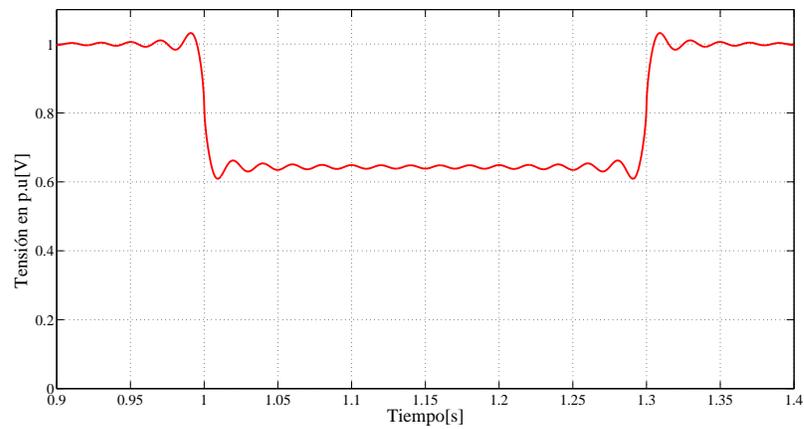


**Figura 9.1.** Modelo Simulink del generador de huecos de tensión monoestado

A continuación se presenta la figura correspondiente a un hueco de tensión rectangular con duración de 0,3 s. Para configurar el hueco se estableció el tiempo de caída y alza en 0 s como se observa en la figura 9.2. En la figura 9.3 se presenta el hueco según su tensión en p.u. También posible configurar huecos no rectangulares al establecer un tiempo de caída o alza diferente de 0 s.

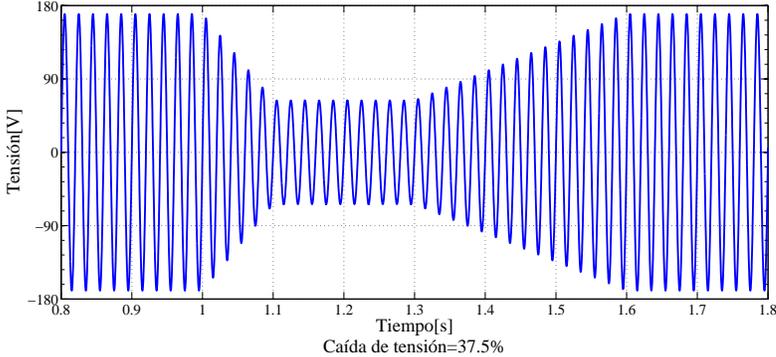


**Figura 9.2.** Generador de huecos de tensión rectangulares a 60Hz

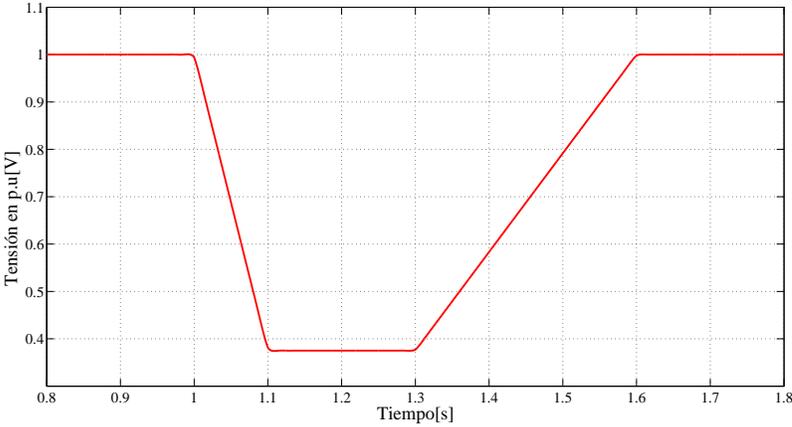


**Figura 9.3.** Generador de huecos de tensión rectangulares a 60Hz en p.u

Para un hueco de tensión no rectangular como el mostrado en la figura 9.4, se realizó una prueba de 0,538 segundos de duración. Se empleó la gráfica 10.2 para facilitar el análisis correspondiente.

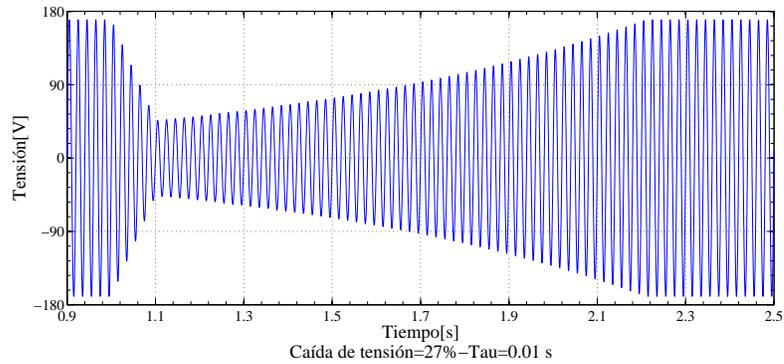


**Figura 9.4.** Generador de huecos de tensión no rectangulares a 60Hz

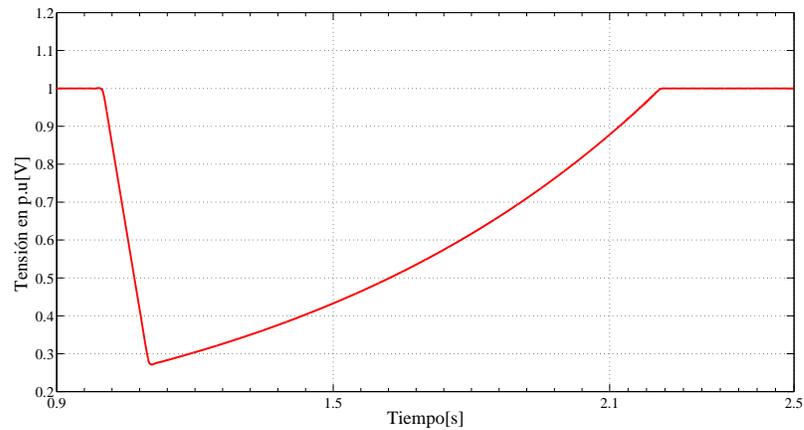


**Figura 9.5.** Generador de huecos de tensión no rectangulares a 60Hz en p.u

La duración de los huecos de tensión producidos por el arranque de motores fue codificada mediante el uso de Matlab para alcanzar el tiempo de recuperación a valor nominal. La prueba puede observarse en valores instantáneos y en valores en p.u en las figuras 9.8 y 10.3. Las gráficas muestran que la duración del hueco de tensión fue de 1.2 segundos.



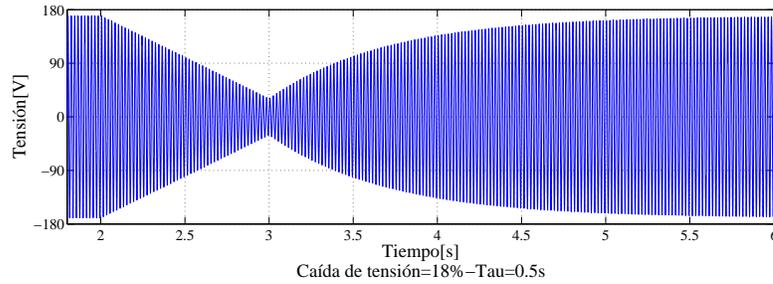
**Figura 9.6.** Generador de huecos de tensión por arranque de motor a 60Hz



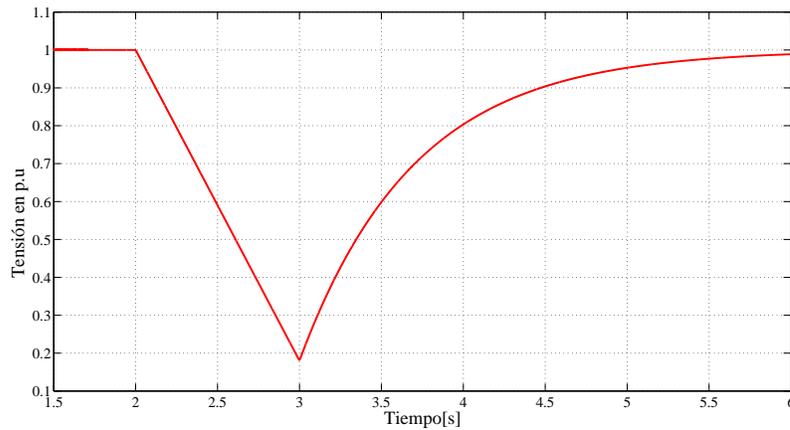
**Figura 9.7.** Generador de huecos de tensión por arranque de motor a 60Hz en p.u

La duración de los huecos de tensión producidos por la saturación de un

transformador fue codificada mediante el uso de Matlab para alcanzar el tiempo de recuperación a valor nominal. En la señal de ejemplo de la figura 9.8, la duración del hueco fue 6 s.



**Figura 9.8.** Generador de huecos de tensión por saturación de transformador 60Hz

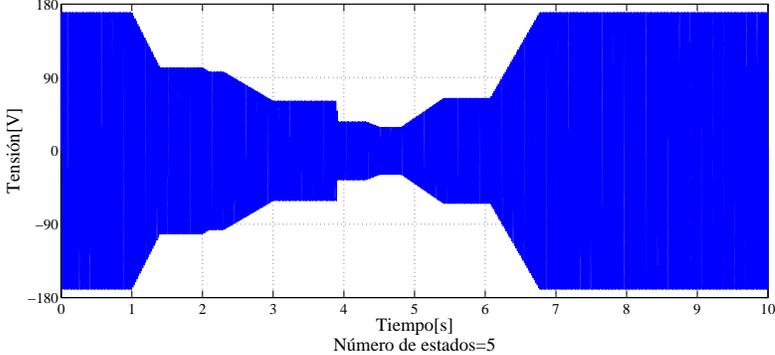


**Figura 9.9.** Generador de huecos de tensión por saturación de transformador a 60Hz en p.u

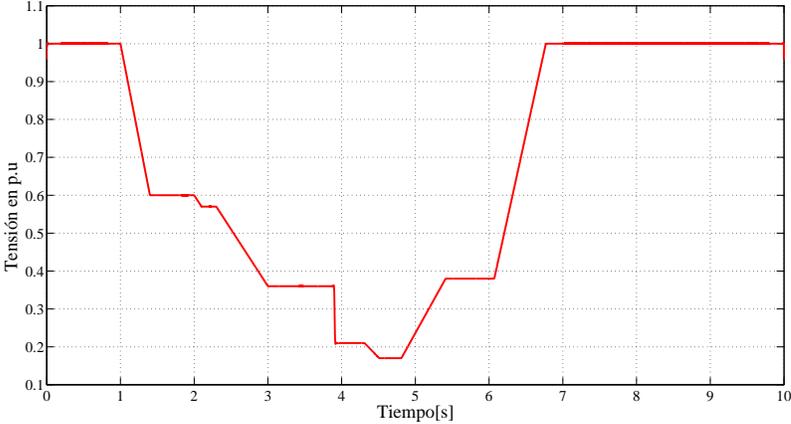
## 9.2. Huecos de tensión multiestado

En la figura 9.10 se presenta un hueco de tensión multiestado. Para este caso se presentan 5 niveles antes de llegar a su punto mínimo. El software desarrollado

es capaz de producir de 3 a 5 niveles. La figura 9.11 muestra el hueco de 5,555 s en valores p.u.



**Figura 9.10.** Generador de huecos de tensión multiestado 60Hz



**Figura 9.11.** Generador de huecos de tensión multiestado a 60Hz en p.u

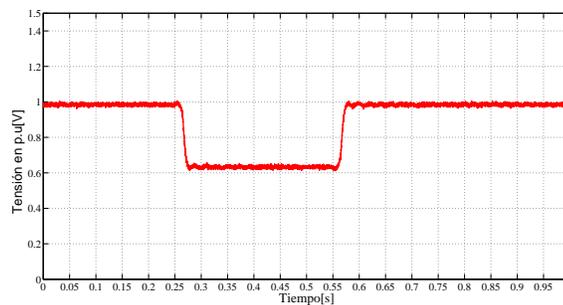
# CAPÍTULO X

## MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL GENERADOR DE HUECOS DE Tensión

Mediante las siguientes pruebas experimentales se quiere comparar la duración de los huecos de tensión corresponden a los resultados de las simulaciones, así como al porcentaje de voltaje retenido del hueco de tensión.

### 10.1. Resultados de la simulación del generador de hueco de tensión rectangular

Un hueco de tensión con forma rectangular corresponde a la clasificación de hueco monoestado. Para esta prueba se comparan los resultados entre las pruebas obtenidas por simulación y la arrojada por el analizador de redes.



**Figura 10.1.** Generador de huecos de tensión rectangulares a 60Hz en p.u

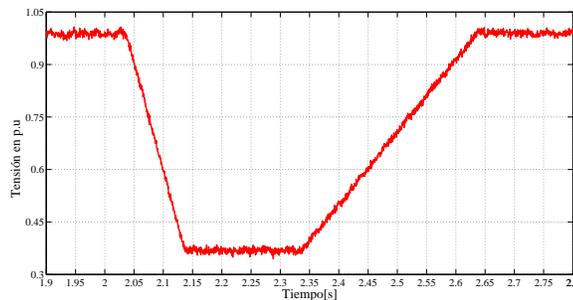
Hueco de tensión	Simulación	Fluke 437
Duración[s]	0.3	0.308
Porcentaje de voltaje retenido[%]	64.326	65.802

**Tabla 10.1.** Resultados de duración de hueco rectangular a 60 Hz

Se puede observar que el error entre la amplitud del hueco de tensión simulado y la medición experimental realizada con el Fluke 437 fue de 2.29 % mientras que el error respecto a la duración del hueco fue de 0.67% Estos errores pueden considerarse aceptables.

### 10.2. Resultados de la simulación del generador de hueco de tensión no rectangular

Para generar el hueco de tensión no rectangular, se toma como forma de onda la simulada en el capítulo anterior mostrada en la figura 9.4.



**Figura 10.2.** Generador de huecos de tensión no rectangulares a 60Hz en p.u

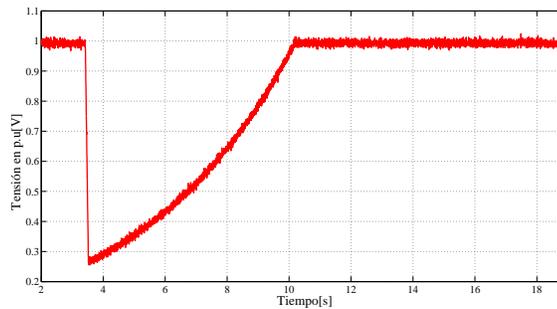
Hueco de tensión	Simulación	Fluke 437
Duración[s]	0,538	0.601
Porcentaje de voltaje retenido[%]	37.5	37.95

**Tabla 10.2.** Resultados de duración de hueco no rectangular a 60 Hz

El error entre la medición de duración del fluke con respecto a la simulación fue de 3,717%. Como se observa en la tabla 10.2, los porcentajes de voltaje retenido tuvieron valores muy cercanos teniendo un error del 1.2 %.

### 10.3. Resultados de la simulación del generador de hueco de tensión por arranque de motor

Para la generación del hueco de tensión por arranque de motor, se toma como referencia la forma de onda presentada en la figura 9.8; Se observa en la tabla 10.3 la duración y el porcentaje de caída de los mismos.



**Figura 10.3.** Generador de huecos de tensión por arranque de motor a 60Hz en p.u

Hueco de tensión	Simulación	Fluke 437
Duración[s]	1.2	7.342
Porcentaje de voltaje retenido[%]	27	27.10

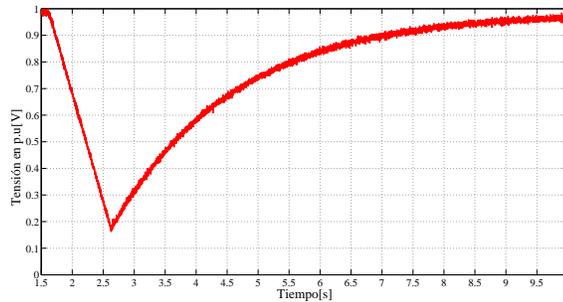
**Tabla 10.3.** Resultados de duración de hueco de tensión por arranque de motor a 60 Hz

Como se observa en la tabla 10.3, los resultados entre las simulaciones y los resultados experimentales, respecto a la duración del hueco, son disímiles. A la luz de los resultados presentados en la prueba del hueco no rectangular, se puede atribuir el resultado de la prueba de hueco por arranque de motor a un error

cometido en la prueba de laboratorio.

#### 10.4. Resultados de la simulación del generador de hueco de tensión por saturación de transformador

Para la prueba de hueco de tensión por saturación de un transformador, se considerará la prueba correspondiente de la simulación según la forma de onda de la figura 9.8. En la tabla 10.4 se presenta la duración y el porcentaje de voltaje retenido de los mismos.



**Figura 10.4.** Generador de huecos de tensión por saturación de transformador a 60Hz en p.u

Hueco de tensión	Simulación	Fluke 437
Duración[s]	6	11.883
Porcentaje de voltaje retenido[%]	18	18.0625

**Tabla 10.4.** Resultados de duración de hueco de tensión por saturación de transformador 60 Hz

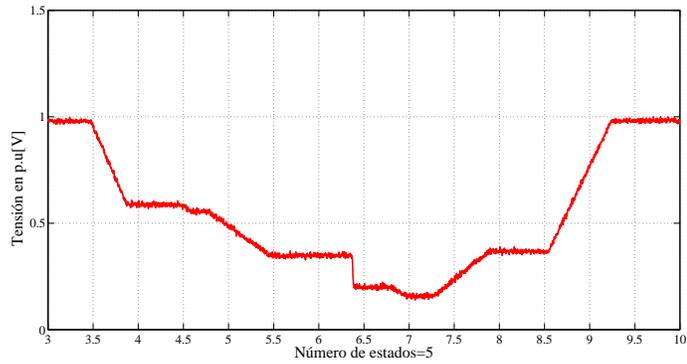
Como se observa en los resultados de la tabla 10.4, para esta prueba, los valores para el tiempo de duración del hueco obtenido mediante simulación y obtenido mediante el montaje experimental son sustancialmente distintos. Dado los resultados encontrados en la prueba de hueco de tensión no rectangular, se puede atribuir esta diferencia de resultados a un error en el montaje de laboratorio.

### 10.5. Resultados de la simulación del generador de hueco de tensión multiestados

Esta prueba consiste en la generación de un hueco de tensión multiestado. En este caso se presentan 5 niveles antes de llegar a su punto mínimo (el software desarrollado es capaz de producir de 3 a 5 niveles). En la tabla datos se presentan los 5 estados y teniendo una duración de 6 segundos. El tiempo de alza es de 1.96 segundos, teniendo un nivel intermedio de 0.66 segundo a un 37.98 % del valor nominal.

Voltaje retenido 1 [%]	60
Voltaje retenido 2 [%]	57
Voltaje retenido 3 [%]	36
Voltaje retenido 4 [%]	21
Voltaje retenido 5 [%]	17
Tiempo de caída 1[s]	0.4
Tiempo a voltaje reducido 1[s]	0.6
Tiempo de caída 2[s]	0.1
Tiempo a voltaje reducido 2[s]	0.2
Tiempo de caída 3[s]	0.7
Tiempo a voltaje reducido 3[s]	0.9
Tiempo de caída 4[s]	0.01
Tiempo a voltaje reducido 4[s]	0.4
Tiempo de caída 5[s]	0.2
Tiempo a voltaje reducido 5[s]	0.3

**Tabla 10.5.** Datos de prueba



**Figura 10.5.** Generador de huecos de tensión multiestado a 60Hz en p.u

Hueco de tensión	Simulación	Fluke 437
Duración[s]	5.555	5.692
Porcentaje de voltaje retenido[%]	17	16.733

**Tabla 10.6.** Resultados de duración de hueco de tensión multiestados a 60 Hz

Esta prueba tiene un comportamiento similar al del hueco rectangular y no rectangular, por lo que su duración y Voltaje retenido presentaron un error pequeño como se aprecia en la tabla 10.6 de un 2,466 % entre la simulación y el medido por el analizador de redes Fluke 437.

# CAPÍTULO XI

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo especial de grado tuvo como objetivo generar los típicos eventos de calidad de energía eléctrica. Esto abre un camino para continuar la investigación acerca de estos eventos en un entorno controlado según los estándares internacionales.

A partir del desarrollo de este trabajo se concluye lo siguiente:

1. Se generaron eventos de calidad de energía con los dispositivos utilizados en este trabajo especial de grado. Estos eventos se generaron mediante simulación y experimentalmente con la ayuda de una tarjeta de adquisición de datos, un amplificador de audio y un transformador. Además se tuvo la capacidad de medir los mismos con un analizador de redes comercial.
2. Se modularon señales con flicker según la norma [11] para medir índices como el  $P_{inst}$  y el  $P_{st}$ .
3. Se logró generar señales con una tasa de distorsión de voltaje (THDv) específica.
4. Se produjeron señales con huecos de tensión monoestado y multiestado especificando la profundidad del hueco y su duración.
5. En las pruebas se determinó que el amplificador de audio Pioneer GM-3602 puede ser usado para generar eventos de calidad de energía siempre que se

considere que la ganancia se limita a medida que el ancho de banda de la señal aumenta.

6. Fue posible adecuar la señal a la salida del amplificador de audio para 120 VAC, con restricciones de frecuencias de trabajos, en la cual según el caso se trabaja a un menor nivel de tensión.

Como recomendaciones para futuros trabajos en el área se tienen:

1. Es necesaria la utilización de un transformador con una relación de transformación mayor frente a la disponible en el laboratorio con el amplificador Pioneer GM-3602. Dado que solo se disponía de un transformador con relación 1:4, no se pudo llegar a los niveles nominales de tensión a la salida del transformador en algunas pruebas.
2. La utilización de un amplificador de mayor potencia que permita alcanzar niveles tensión mayores sin distorsionar la señal puede solventar los problemas en la limitación de voltaje 120 V.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Axelberg, I. Y.-H. Gu, and M. Bollen, *Support Vector Machine for Classification of Voltage Disturbance. IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007.
- [2] J. Benavides, *Modelado y Simulación de un Medidor de Calidad de suministro Eléctrico usando el software Labview.*, 2008.
- [3] W.-N. Chang and C.-J. Wu, “Design and applications of a flicker voltage generator,” IEEE., 1995.
- [4] J. Das, *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, 2015.
- [5] ECAMEC-TECNOLOGIA, “Serie iec 61000-4-30: Parte 4- medición de armónicos e interarmónicos,” 2009.
- [6] Z. Hanzelka and A. Bieñ, *Armónicos-Interarmónicos*, 2004.
- [7] IEC61000-2-1, *IEC 61000-2-2 International Standard. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment Section 1: Description of the environment - Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems*, 1990.
- [8] IEC61000-2-11, *IEC 61000-4-11 International Standard. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-11: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests*, 2004.
- [9] . IEC61000-2-2, *IEC 61000-2-2 International Standard. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Niveles de compatibilidad para las*

*perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión.*, 2002.

- [10] IEC61000-3-7, *IEC 61000-3-7, Technical Report. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3- 7: Límites: Evaluación de los límites de emisión para la conexión de instalaciones con fluctuaciones de tensión para sistemas de potencia MV, HV y EHV.*, 2008.
- [11] IEC61000-4-15, *IEC 61000-4-15 International Standard. Basic EMC Publication. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications. Edition 2.0.*, 2010.
- [12] IEC61000-4-7, *IEC 61000-3-7, Technical Report. Electromagnetic compatibility (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*, 2009.
- [13] K.Yao, D.Koval, W.Su, and J.Salmon, *Modelling Consumer Voltage Sags by Distribution Primary Faults. Electrical and Computer Engineering*, 1999.
- [14] R. C. Leborgne, *Voltage Sags Characterisation and Estimation*, 2005.
- [15] D. E. A. Montoya A, *Realización del Flickermetro de la Norma IEC-61000-4-15 mediante la Transformada Ondícula.*, 2006.
- [16] —, *Apuntes de Flicker*, Octubre 2014.
- [17] S. J. Oviedo and L. M. Rueda, “Diseño del prototipo del módulo para la monitorización del fenómeno flicker para una unidad constructiva de medición de parámetros de calidad de potencia eléctrica, con base en el estándar iec 61000-4-15. master’s thesis,” Universidad Industrial de Santander - Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas., 2008.

- [18] R. Rivero, “Diseño de un instrumento para la evaluación de la calidad de servicio eléctrico a nivel de subscritor.” Universidad Central de Venezuela, Caracas. Venezuela, 2002.
- [19] J. Santacana, *Modelado, simulación e implementación del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 usando el software de programación Labview*, 2009.
- [20] J. Solano, P. Suárez, O. Plata, and B. N. nez, *Caracterización, identificación y localización de huecos de tensión: revisión del estado del arte*, 2012.
- [21] UNE-EN50160, *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*, 1999.
- [22] R. Wierda, “Cuaderno técnico no. 176. flicker o parpadeo de las fuentes luminosas,” Technical Report, Schneider Electric, 2001.