



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS DEL EFECTO PRODUCIDO EN LA EXACTITUD DE MEDIDORES DE ENERGÍA
ELÉCTRICA DEBIDO A DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA CORRIENTE DE CARGA**

Amílcar Antonio Cabrera Ayuso

Asesorado por el Ing. Juan Pablo Yoc De La Cruz

Guatemala, noviembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL EFECTO PRODUCIDO EN LA EXACTITUD DE MEDIDORES DE ENERGÍA
ELÉCTRICA DEBIDO A DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA CORRIENTE DE CARGA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

AMÍLCAR ANTONIO CABRERA AYUSO

ASESORADO POR EL ING. JUAN PABLO YOC DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobar Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

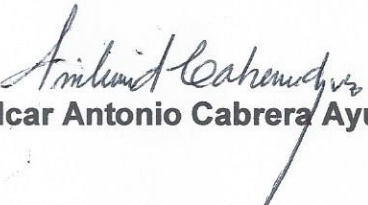
DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Carlos Francisco Gressi López
EXAMINADOR	Dr. Juan Carlos Córdoba Zeceña
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DEL EFECTO PRODUCIDO EN LA EXACTITUD DE MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEBIDO A DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA CORRIENTE DE CARGA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 6 de junio de 2017.


Amílcar Antonio Cabrera Ayuso

Guatemala, 10 de julio de 2,019

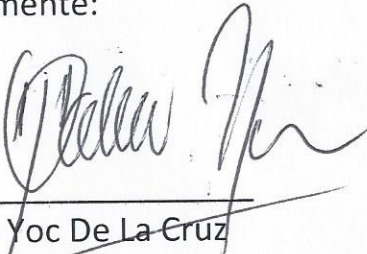
Ingeniero
Otto Fernando Andrino González
Coordinador del Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Ingeniero:

Por este medio le informo que doy por aprobado el trabajo de graduación titulado: "**Análisis del efecto producido en la exactitud de medidores de energía eléctrica debido a distorsión armónica en la corriente de carga**" del estudiante Amilcar Antonio Cabrera Ayuso, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y yo, como su asesor nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me suscribo atentamente:

F. 
Ing. Juan Pablo Yoc De La Cruz
Colegiado No. 7689

*Juan Pablo Yoc de la Cruz
Ingeniero Mecánico Electricista
Colegiado 7689*



REF. EIME 57. 2019.

4 de SEPTIEMBRE 2019.

Señor Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**ANÁLISIS DEL EFECTO PRODUCIDO EN LA EXACTITUD DE
MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEBIDO A
DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA CORRIENTE DE CARGA,**
del estudiante; Amilcar Antonio Cabrera Ayuso, que cumple con
los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Otto Fernando Andrino González
Coordinador de Electrotécnica





REF. EIME 57. 2019.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación de el estudiante: AMILCAR ANTONIO CABRERA AYUSO titulado; ANÁLISIS DEL EFECTO PRODUCIDO EN LA EXACTITUD DE MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEBIDO A DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA CORRIENTE DE CARGA, procede a la autorización del mismo.


Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



GUATEMALA, 30 DE SEPTIEMBRE 2019.



La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DEL EFECTO PRODUCIDO EN LA EXACTITUD DE MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEBIDO A DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA CORRIENTE DE CARGA**, presentado por el estudiante universitario: **Amílcar Antonio Cabrera Ayuso**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, Noviembre de 2019

AACE/asga
cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por sobre todas las cosas.
Mis padres	Rudy Cabrera y Juanita Ayuso de Cabrera, por habérmelo dado todo en la vida, brindándome educación, amor y sobre todo el buen ejemplo de esfuerzo y dedicación.
Mis hermanos	Rudy, Johanna, Regina y Juan Eduardo Cabrera Ayuso, por todo su apoyo, ejemplo e inspiración.
Mis sobrinos	Por su motivación y su cariño para ser cada día mejor persona.
Especialmente	A las personas que día a día estudian y trabajan por forjarse un mundo mejor y sacar adelante el país.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme educación superior y proveer la oportunidad a miles de guatemaltecos para superarse.
Catedráticos de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica	Por su noble labor y dedicación formando profesionales con principios y valores.
Compañeros de estudio	Por todo su apoyo, solidaridad y enseñanzas durante los años de estudio.
Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A.	Por ser una fuente inagotable de aprendizaje en conocimientos técnicos, formación personal y profesional. Especialmente a los compañeros del Departamento de Inspección, Pérdidas y Medida.
Laboratorio Metric	Por todo el apoyo brindado para realizar este trabajo de graduación.
Ingenieros	Giovanni Salazar, Juan Pablo Yoc, Julio Alfredo Salazar, Samuel Ramirez, Arturo Cruz, Wilson Pérez, Julio González, Elmar Fuentes, Roberto Román, José Manuel Solís, Jaime Mercar, por toda la ayuda que me brindaron.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
GLOSARIO	XIX
RESUMEN.....	XXV
OBJETIVOS.....	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. METROLOGÍA ELÉCTRICA	1
1.1. Medición de parámetros eléctricos	1
1.2. Proceso de medición	2
1.2.1. Magnitudes	2
1.2.2. Sistema de magnitudes	3
1.2.3. Unidad de medida.....	3
1.2.4. Mediciones.....	4
1.3. Características de las mediciones	6
1.3.1. Exactitud	6
1.3.2. Error.....	6
1.3.3. Precisión	6
1.3.4. Repetitividad y reproducibilidad	7
1.3.5. Magnitud de influencia	7
1.4. Clasificación de los errores.....	8
1.4.1. Error grueso.....	8
1.4.2. Error sistemático	8
1.4.3. Error aleatorio	9
1.4.4. Error ambiental	9

1.5.	Proceso de calibración	9
1.5.1.	Calibración	9
1.5.1.1.	Recomendaciones previo a la calibración	11
1.5.1.2.	Recomendaciones durante la calibración	12
1.5.1.3.	Recomendaciones posteriores a la calibración	13
1.5.2.	Verificación.....	14
1.5.3.	Validación.....	15
1.5.4.	Incertidumbre	15
1.5.4.1.	Cálculo de incertidumbre.....	16
1.5.4.2.	Evaluaciones tipo A.....	18
1.5.4.3.	Evaluaciones tipo B.....	19
1.5.4.4.	Propagación de incertidumbres.....	20
1.5.5.	Trazabilidad.....	22
1.5.6.	Patrones de medición.....	23
1.5.6.1.	Patrón internacional	24
1.5.6.2.	Patrón nacional	25
1.5.6.3.	Patrón primario.....	26
1.5.6.4.	Patrón secundario	27
1.5.6.5.	Patrón de referencia.....	28
1.5.6.6.	Patrón de trabajo.....	28
1.5.7.	Competencia técnica.....	29
2.	MEDIDORES DE ENERGÍA Y POTENCIA ELÉCTRICA.....	31
2.1.	Principio de funcionamiento de medidores de estado solido....	31
2.2.	Medidores multifunción	31
2.3.	Principales partes de un medidor	32

2.4.	Tipos de medidores	33
2.5.	Clasificación de medidores	33
2.5.1.	Por su uso o servicio	33
2.5.1.1.	Medidores residenciales	34
2.5.1.2.	Medidores industriales.....	34
2.5.1.3.	Medidores AMI.....	35
2.5.1.4.	Medidores de calidad de potencia	36
2.5.2.	Por su forma de construcción	36
2.5.2.1.	Medidores electromecánicos	37
2.5.2.2.	Medidores de estado sólido	37
2.5.3.	Por su forma de conexión y número de fases.....	38
2.5.3.1.	Medidores monofásicos	38
2.5.3.2.	Medidores trifásicos	38
2.5.3.3.	Medidores tipo network.....	39
2.5.4.	Por su clase de corriente	39
2.5.4.1.	Medición directa.....	40
2.5.4.2.	Medición semi indirecta	40
2.5.4.3.	Medición indirecta	42
2.5.5.	Por su clase de exactitud.....	43
2.6.	Características de medidores	44
2.6.1.	Rango de tensión.....	44
2.6.2.	Corriente de prueba	45
2.6.3.	Forma de conexión	45
2.6.4.	Constantes K_h , K_t , K_d	46
2.6.5.	Bobinas de corriente	46
2.6.6.	Tarjeta de medición	47
2.6.7.	Tarjeta de comunicación.....	48
2.6.8.	Salida de relé.....	49
2.7.	Modo de operación	50

2.7.1.	Modo normal	50
2.7.2.	Modo de prueba	51
2.7.3.	Modo alterno	51
2.7.4.	Modo diagnóstico	52
2.8.	Transformadores de instrumento	52
2.8.1.	Transformadores de corriente	53
2.8.2.	Transformadores de potencial.....	54
2.8.3.	Burden.....	55
2.8.4.	Factor de corriente térmico.....	56
3.	ARMÓNICOS Y SERIES DE FOURIER	57
3.1.	Calidad de potencia.....	57
3.2.	Origen de los armónicos	59
3.3.	Función de onda periódica	61
3.4.	Serie de Fourier	61
3.5.	La transformada de Fourier.....	63
3.6.	Amplitud y orden	66
3.7.	Valor eficaz	67
3.8.	Espectro armónico de amplitud.....	67
3.9.	Espectro armónico de fase.....	68
3.10.	Clasificación de armónicas.....	68
3.10.1.	Armónicas pares	68
3.10.2.	Armónicas impares.....	69
3.10.3.	Armónicas triples.....	69
3.10.4.	Sub-armónica.....	69
3.10.5.	Inter armónica	69
3.11.	Factores de distorsión armónica	69
3.11.1.	Factor de distorsión armónico total (THD).....	70
3.11.2.	Factor de distorsión armónico total de tensión	70

3.11.3.	Factor de distorsión armónico total de corriente	71
3.12.	Principales fuentes de armónicos	71
3.13.	Consecuencia de los armónicos	74
3.14.	Medición de armónicas	76
3.15.	Efecto de los armónicos en instrumentos de medición	77
4.	NORMATIVA DE MEDICIÓN COMERCIAL Y CALIDAD DE POTENCIA	79
4.1.	Organismos reguladores	79
4.1.1.	Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR)	79
4.1.2.	Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) ...	79
4.1.3.	Administrador del Mercado Mayorista (AMM)	80
4.2.	Normas aplicables a medidores de energía eléctrica	80
4.2.1.	Norma NTG OIML R 46/1 y R 46/2:2012	81
4.2.1.1.	Requisitos de exactitud	82
4.2.1.2.	Condiciones nominales de funcionamiento	82
4.2.1.3.	Error máximo permitido de carga	84
4.2.1.4.	Efectos por magnitudes de influencia ..	85
4.2.2.	Norma ANSI C12.1 para medidores de electricidad	86
4.2.2.1.	Patrones y trazabilidad	86
4.2.2.2.	Condiciones de laboratorio	87
4.2.2.3.	Referencia de temperatura y humedad	88
4.2.2.4.	Requerimientos de desempeño para patrones de energía	88

4.2.2.5.	Requerimientos de desempeño y condiciones de prueba	90
4.2.2.6.	Prueba de corriente de arranque.....	91
4.2.2.7.	Prueba de desempeño de carga	92
4.2.2.8.	Prueba de efecto de variación del factor de potencia.....	93
4.2.2.9.	Desempeño en condiciones de servicio	94
4.2.2.10.	Determinación del porcentaje de registro	95
4.2.2.11.	Método 1	96
4.2.2.12.	Método 2	96
4.2.2.13.	Método 3	96
4.2.2.14.	Método 4	96
4.2.3.	Norma ANSI C12.10, aspectos físicos para medidores de energía y normas de seguridad	97
4.2.4.	Norma ANSI C12,20, medidores de energía clases de exactitud 0,1, 0,2 y 0,5	98
4.2.4.1.	Requisitos de salida de prueba	99
4.2.4.2.	Requisitos de desempeño y condiciones de prueba	99
4.2.4.3.	Prueba de corriente de arranque.....	101
4.2.4.4.	Prueba de desempeño de carga	101
4.2.4.5.	Prueba de efecto de variación de factor de potencia.....	102
4.2.4.6.	Influencia de armónicos y efecto de forma de onda no senoidal	103
4.2.4.7.	Prueba núm. 39 forma de onda 90 grados cortada	104

4.2.4.8.	Prueba núm. 40 forma de onda cuadrada.....	106
4.2.4.9.	Prueba núm. 41 forma de onda pico..	107
4.2.4.10.	Prueba núm. 42 forma de onda pulso	109
4.2.4.11.	Prueba núm. 43 forma onda de corriente con múltiple cruce de cero..	111
4.2.4.12.	Prueba núm. 44 forma de onda de tensión con múltiple cruce de cero	113
4.3.	Normas aplicables a calidad de potencia	115
4.3.1.	Norma IEC 61000-4-30:2003 técnicas de ensayo y medición métodos de medición de calidad de potencia	115
4.3.1.1.	Clases de rendimiento de medición...	116
4.3.1.2.	Parámetros de armónicos de tensión	117
4.4.	Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD).....	117
4.4.1.	Evaluación de la calidad del producto suministrado por el distribuidor	118
4.4.2.	Evaluación de la incidencia del usuario en la calidad del producto.....	118
4.4.3.	Período de medición.....	118
4.4.4.	Regulación de tensión	119
4.4.5.	Desbalance de tensión en los servicios trifásicos.	120
4.4.6.	Distorsión armónica de la tensión generada por el distribuidor	121
4.4.7.	Distorsión armónica de la corriente generada por el usuario	123
4.5.	Norma NCC-14, Habilitación comercial para operar en el Mercado Mayorista y Sistema de Medición Comercial	126

4.5.1.	Elementos del equipo de medición.....	127
4.5.2.	Medidores.....	127
4.5.3.	Transformadores de instrumento	128
4.5.4.	Comunicaciones.....	130
4.5.5.	Verificaciones periódicas.....	131
4.5.6.	Pruebas en laboratorio para medidores	133
4.5.7.	Verificaciones no periódicas.....	134
4.6.	Norma COGUANOR NTG/ISO/IEC 17025 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.....	134
4.6.1.	Imparcialidad.....	135
4.6.2.	Confidencialidad.....	136
4.6.3.	Alcance.....	136
4.6.4.	Personal	136
4.6.5.	Instalaciones y condiciones ambientales	137
4.6.6.	Equipo	137
4.6.7.	Trazabilidad metrológica	138
4.6.8.	Selección, verificación y validación de métodos....	138
4.6.9.	Evaluación de la incertidumbre	138
4.6.10.	Registros técnicos	139
4.6.11.	Control de documentos y registros.....	139
4.6.12.	Auditorías internas	140
4.6.13.	Revisión por la dirección	140
5.	ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA EXACTITUD DE MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	141
5.1.	Sistema automático de calibración RS-933.....	141
5.1.1.	Características del Sistema automático de calibración RS-933	141

5.1.2.	Parámetros de medición	143
5.1.3.	Exactitud	144
5.1.4.	Certificado de calibración	144
5.1.5.	Diagrama de conexiones	144
5.2.	Condiciones de laboratorio	145
5.2.1.	Monitor de temperatura y humedad	146
5.2.2.	Equipo de protección personal	147
5.3.	Metodología	147
5.4.	Procedimiento de prueba	147
5.5.	Configuración de parámetros de prueba	149
5.5.1.	Definición del instrumento bajo calibración	149
5.5.2.	Definición de formas de onda	150
5.5.3.	Definición de plantillas de prueba	151
5.6.	Medidores a verificar	152
5.7.	Verificación de medidores de energía	153
5.7.1.	Verificación de medidores en laboratorio con onda senoidal pura	155
5.7.2.	Verificación de medidores en laboratorio con onda distorsionada	155
5.7.3.	Resultados de verificación	157
5.7.3.1.	Resultados de medidor núm. 1 serie MW-1507A947-02	157
5.7.3.2.	Resultados de medidor núm. 2 serie 138297421	158
5.7.3.3.	Resultados de medidor núm. 3 serie 142771916	160
5.7.3.4.	Resultados de medidor núm. 4 serie 7992845	162
5.8.	Análisis de resultados de verificación de medidores	164

5.9. Análisis del efecto de la distorsión armónica en medidores de energía eléctrica.....	172
CONCLUSIONES.....	177
RECOMENDACIONES	179
BIBLIOGRAFÍA.....	181

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ejemplos de instrumentos de medición eléctrica	2
2.	Magnitudes y unidades básicas del Sistema Internacional SI.....	4
3.	Medición de masas	5
4.	Representación gráfica de exactitud y precisión	7
5.	Calibración de un medidor de energía eléctrica	10
6.	Calibración de transformadores de instrumento.....	12
7.	Monitor de temperatura y humedad en un laboratorio de calibración ..	13
8.	Verificación de medidores de energía eléctrica.....	15
9.	Incertidumbre de una medición	16
10.	Estructura de trazabilidad.....	23
11.	Patrón internacional de masa.....	25
12.	Mesa de calibración de medidores de energía de múltiples posiciones	26
13.	Patrón primario de transferencia para energía eléctrica.....	27
14.	Patrón secundario de energía eléctrica.....	28
15.	Patrón de trabajo para verificar medidores de energía eléctrica	29
16.	Principales componentes de un medidor de energía eléctrica	32
17.	Medidor de estado sólido para uso residencial	34
18.	Medidor de estado sólido para uso comercial e industrial.....	35
19.	Medidor de estado sólido con tecnología AMI.....	35
20.	Medidor de energía con parámetros de calidad de potencia.....	36
21.	Medidor electromecánico monofásico	37
22.	Medición secundaria en caja tipo III	41

23.	Medición primaria en media tensión	43
24.	Curva de carga típica para un medidor con exactitud 0,2 %.....	45
25.	Esquema de conexión interna para forma 9S	46
26.	Bobina de corriente con transductor tipo devanado.....	47
27.	Tarjeta de medición	48
28.	Medidor con tarjeta de comunicación	49
29.	Medidor con tarjeta de opciones entrada/salida	50
30.	Indicador de modo de operación en un medidor.....	51
31.	Transformadores de corriente tipo devanado y tipo ventana.	53
32.	Transformador de potencial para medición.....	55
33.	Onda senoidal pura y onda distorsionada.....	58
34.	Formas de onda características para perturbaciones	59
35.	Cargas no lineales	60
36.	Degradación de la tensión de red producida por una carga no lineal ...	61
37.	Onda senoidal con tercera armónica al 20 %	66
38.	Gráfico de espectro de amplitud armónica	68
39.	Características de algunos generadores de armónicos	73
40.	Espectro de corriente que alimenta un horno en corriente alterna	77
41.	Forma de onda 90° cortada	105
42.	Forma de onda cuadrada en corriente.....	107
43.	Forma de onda pico en corriente	108
44.	Forma de onda pulso en corriente	110
45.	Forma de onda de corriente con múltiple cruce de cero	112
46.	Forma de onda de tensión con múltiple cruce de cero	114
47.	Sistema automático de calibración Radian RS-933	142
48.	Diagrama de conexión medidor	145
49.	Configuración de instrumento bajo calibración	150
50.	Edición de forma de onda	151
51.	Plantilla de pruebas	152

52.	Equipo patrón, cables de conexión, sensor y accesorios.....	154
53.	Medidor de energía conectado al equipo patrón.	154
54.	Plantilla de prueba para señales de corriente con distorsión armónica	156

TABLAS

I.	Burden normalizado para transformadores de corriente	56
II.	Efectos de los armónicos en dispositivos eléctricos.....	75
III.	Condiciones nominales de corriente medición directa	84
IV.	Condiciones nominales de corriente medición indirecta.....	84
V.	Errores base máximos permitidos.....	85
VI.	Cambio en los límites de error debido a armónicos	86
VII.	Condiciones de referencia.....	89
VIII.	Porcentaje de error de patrones de referencia y portátiles.....	89
IX.	Listado de pruebas norma ANSI C12.1:2018.....	90
X.	Prueba de corriente de arranque	92
XI.	Prueba de desempeño de carga	92
XII.	Efecto de la variación de factor de potencia, un solo elemento	93
XIII.	Efecto de la variación de factor de potencia en medidores de dos elementos.....	94
XIV.	Clases de corriente y corrientes de prueba.....	97
XV.	Carga con servicio polifásico usado en prueba de exactitud.....	100
XVI.	Prueba de corriente de arranque	101
XVII.	Prueba de desempeño de carga	102
XVIII.	Efecto de la variación del factor de potencia para medidores de tres elementos.....	103
XIX.	Valores de <i>I_{ref}</i> para la corriente	104

XX.	Requerimiento de desempeño con forma de onda 90 grados cortada.....	105
XXI.	Forma de onda cuadrada.....	106
XXII.	Requerimiento de desempeño con forma de onda cuadrada	107
XXIII.	Forma de onda pico	108
XXIV.	Requerimiento de desempeño con forma de onda pico.....	109
XXV.	Forma de onda pulso	110
XXVI.	Requerimiento de desempeño con forma de onda pulso.....	111
XXVII.	Forma de onda de corriente con múltiple cruce de cero	112
XXVIII.	Requerimiento de desempeño con forma de onda de corriente con múltiple cruce de cero.....	113
XXIX.	Forma de onda de tensión con múltiple cruce de cero	114
XXX.	Requerimiento de desempeño con forma de onda de tensión con múltiple cruce de cero.....	115
XXXI.	Tolerancia admisible respecto al valor nominal en %	119
XXXII.	Tolerancias para desbalance de tensión trifásico	121
XXXIII.	Tolerancias para la distorsión armónica de la tensión	122
XXXIV.	Tolerancias para la distorsión armónica de corriente.....	124
XXXV.	Exactitud y burden en puntos de medición mayores de 69 kV	129
XXXVI.	Exactitud y burden en puntos de medición igual o menor a 69kV	130
XXXVII.	Características de medidores a verificar	153
XXXVIII.	Números de serie de medidores a verificar	153
XXXIX.	Puntos de prueba para onda senoidal pura	155
XL.	Puntos de prueba para condiciones con distorsión armónica.....	156
XLI.	Resultados de prueba con onda senoidal para medidor núm. 1	157
XLII.	Resultados de prueba con armónicos para medidor núm. 1.....	158
XLIII.	Resultados de prueba con onda senoidal para medidor núm. 2.....	159
XLIV.	Resultados de prueba con armónicos para medidor núm. 2.....	160
XLV.	Resultados de prueba con onda senoidal para medidor núm. 3.....	161

XLVI.	Resultados de prueba con armónicos para medidor núm. 3	162
XLVII.	Resultados de prueba con onda senoidal para medidor núm. 4	163
XLVIII.	Resultados de prueba con armónicos para medidor núm. 4	164
XLIX.	Evaluación del medidor núm. 1 desempeño de carga	165
L.	Evaluación del medidor núm. 2 desempeño de carga	166
LI.	Evaluación del medidor núm. 3 desempeño de carga	167
LII.	Evaluación del medidor núm. 4 desempeño de carga	168
LIII.	Evaluación de medidor núm. 1 desempeño con armónicos	169
LIV.	Evaluación del medidor núm. 2 desempeño con armónicos	170
LV.	Evaluación del medidor núm. 3 desempeño con armónicos	171
LVI.	Evaluación del medidor núm. 4 desempeño con armónicos	172

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
CL	Clase de exactitud
Kt	Constante de prueba
Kh	Constante de registro de energía
C.A.	Corriente alterna
TA	Corriente de prueba
°	Grados
Hz	Hercios
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
kVA	Kilo voltamperio
kVAR	Kilo voltamperio reactivo
kVARh	Kilo voltamperio reactivo hora
Ω	Ohmio
LCD	Pantalla de cristal líquido
ppm	Partes por millón
VTR	Relación de transformación de potencial
CTR	Relación de transformación de corriente
CT	Transformador de corriente
PT	Transformador de potencial
W	Vatio
V	Voltio

GLOSARIO

AMI	Por sus siglas en inglés <i>Advanced Metering Infrastructure</i> , (Infraestructura de medición avanzada).
ANSI	Por sus siglas en inglés <i>American National Estándar Institute</i> , (Instituto nacional Americano de estándares).
BIPM	Buró internacional de pesos y medidas.
Circuito integrado	Placa impresa donde se colocan dispositivos electrónicos como diodos, transistores, capacitores, entre otros, para formar un circuito eléctrico.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Corriente	Flujo de electrones a través de un material conductor.
Covarianza	valor que indica el grado de variación conjunta de dos variables aleatorias respecto a sus medias.
Cualitativo	Propiedad de un objeto que puede ser descrito por sus características o aspecto físico.

Cuantitativo	Propiedad de un objeto que puede ser descrito por valores medibles.
Digital	Sistema de representación mediante dos dígitos.
<i>Display</i>	Pantalla de visualización.
EOR	Ente operador regional del mercado eléctrico de américa central, organismo encargado de operar y planificar el Sistema Eléctrico de Centro América y administrar el mercado eléctrico.
EPROM	Por sus siglas en inglés <i>Erasable Programmable Read Only Memory</i> , (Memoria de solo lectura programable y borrrable).
Espectro	Distribución de frecuencias de una onda electromagnética.
<i>Ethernet</i>	Estándar de redes de área local para computadoras.
<i>Flicker</i>	Parpadeo, es un disturbio en la amplitud de la tensión eléctrica.
GPRS	Por sus siglas en inglés <i>General Packet Radio Service</i> , es una tecnología de comunicaciones móviles.

GUM	Por sus siglas en inglés <i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> , (Guía para la expresión de la incertidumbre de medida), es un documento que constituye la referencia para el cálculo de incertidumbre de medición.
IBC	Instrumento bajo calibración.
IEC	Por sus siglas en inglés International Electrotechnical Commission, (Comisión Electrotécnica Internacional), es una organización de normalización internacional en los campos eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas.
IEEE	Por sus siglas en inglés Institute of Electrical and Electronics Engineers, (Instituto de ingenieros electricistas y electrónicos), es una asociación mundial de ingenieros dedicada a la normalización y el desarrollo en áreas técnicas.
ISO	Por sus siglas en inglés <i>International Organization for Standardization</i> , (Organización internacional para la estandarización), es una organización para la creación de estándares internacionales compuesta por diversas organizaciones nacionales de estandarización.
LGE	Ley General de Electricidad, Decreto No. 93-96 del Congreso de la República de Guatemala, ley que fue

implementada para desarrollar y asegurar el Sistema Eléctrico de Guatemala.

MER	Mercado Eléctrico Regional, tratado marco aprobado por los gobiernos de Centroamérica en el cual los agentes habilitados realizan transacciones de energía eléctrica en la región centroamericana.
Mesurando	Magnitud particular sujeta a medición.
Metrología	Ciencia de las mediciones.
Microcontrolador	Circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria.
NCC14	Norma de coordinación comercial del Administrador del Mercado Mayorista de Guatemala.
NEMA	Por sus siglas en inglés: National Electrical Manufacturers Association, que significa Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos, es una asociación industrial estadounidense.
Neutro	Elemento de un circuito eléctrico que es la referencia de la diferencia de potencial.
NTSD	Normas Técnicas del Servicio de Distribución.
OGA	Oficina Guatemalteca de Acreditación.

OIML	Organización Internacional de Metrología Legal, organización intergubernamental creada para promover la armonización de los procedimientos de metrología legal.
Patrón	Es un instrumento de medición, destinado a reproducir una magnitud para utilizarse como referencia y que sirvan de comparación a otros elementos de medida.
PLC	Por sus siglas en inglés: Power Line Communications, que significa Comunicaciones mediante línea de potencia, es una tecnología que utiliza las líneas de transmisión de energía eléctrica con propósitos de comunicación.
RLGE	Reglamento de la ley general de electricidad, acuerdo gubernativo No. 256-97 desarrolla los procedimientos necesarios para el cumplimiento de lo dispuesto en la Ley General de Electricidad.
RMS	Por sus siglas en inglés: Root mean square, que significa raíz de la media cuadrática.
RS-232	Por sus siglas en inglés: Recommended Standar 232, que significa Estandar recomendado 232, es una interfaz que designa una norma para el intercambio de datos.

Sag	Perturbación en la señal de tensión en forma de caída momentánea del valor.
SENOIDAL	Forma de onda de una señal eléctrica.
Shunt	Forma de un circuito eléctrico en derivación.
Smart Grid	Red eléctrica inteligente.
Socket	Forma de conexión a base de presión para componentes de circuitos eléctricos.
Swell	Perturbación en la señal de tensión en forma de subida momentánea del valor.
Termohigrómetro	Instrumento para medir temperatura y humedad.
UPS	Por sus siglas en inglés: uninterruptible power supply, que significa Sistema de alimentación ininterrumpida.
Varianza	Medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media.

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza cómo se ve afectada la exactitud de medidores de energía eléctrica por distorsión armónica en la corriente de carga. Se describe y se resume inicialmente los conceptos fundamentales referentes a metrología.

Se presenta las principales características de construcción y operación de los medidores de energía eléctrica de estado sólido; se explica la forma en que se clasifican, las formas de conexiones y la utilización de transformadores de instrumento para medición.

Se explica los conceptos referente a los contenidos armónicos y las series de Fourier, se describe las características, las causas y las consecuencias del contenido de señales armónicas en los sistemas eléctricos.

Se resume la normativa nacional e internacional vigente referente a medidores de energía eléctrica, laboratorios de calibración, el reglamento de la ley general de electricidad y el reglamento del administrador de mercado mayorista.

El análisis se basa en el resultado de pruebas de verificación realizadas a varios medidores de energía eléctrica en condiciones de laboratorio para evaluar su desempeño de exactitud bajo la influencia de señales de corriente armónico en la tensión y corriente de prueba.

OBJETIVOS

General

Analizar el efecto que produce la distorsión armónica de la corriente de carga en la exactitud de medidores de energía eléctrica.

Específicos

1. Efectuar pruebas de verificación de exactitud a medidores en condiciones de laboratorio bajo corrientes con distorsión armónica.
2. Identificar la normativa vigente a nivel nacional e internacional sobre medidores de energía eléctrica.
3. Describir el funcionamiento, operación y componentes de los medidores de energía eléctrica.
4. Explicar las causas y los efectos de las corrientes armónicas en los sistemas eléctricos.
5. Conocer los requisitos técnicos y de gestión que debe cumplir un laboratorio de metrología eléctrica

INTRODUCCIÓN

El suministro de energía eléctrica es fundamental para la actividad económica del país, contar con un servicio continuo y de buena calidad promueve la competitividad en la industria y el comercio; el avance tecnológico ha transformado las vidas provocando que el fluido eléctrico sea indispensable en el qué hacer diario.

Tanto en los mercados eléctricos como en distribución al usuario final es importante una medición adecuada de los parámetros de calidad del producto y más aún de la medición con fines de facturación. Por tanto es de suma importancia que los medidores de energía eléctrica cumplan con la exactitud especificada en las normas o reglamentos de los organismos que regulan el sector eléctrico.

Para garantizar una medición adecuada se debe contar con equipos de calibración y verificación de medidores de energía, laboratorios de metrología competentes y personal capacitado.

En condiciones de servicio los medidores se ven afectados por variedad de fenómenos producidos en los sistemas eléctricos. Uno de estos fenómenos es la distorsión armónica en la corriente y tensión eléctrica.

En este trabajo se analizará los efectos de la distorsión armónica de la corriente en la exactitud de los medidores de energía eléctrica.

1. METROLOGÍA ELÉCTRICA

Metrología es la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones. La metrología eléctrica incluye la medición de los fenómenos eléctricos y electromagnéticos. En este capítulo se presentan los conceptos básicos y los fundamentos de metrología orientado a las magnitudes eléctricas y a la medición de energía eléctrica.

1.1. Medición de parámetros eléctricos

La medición de parámetros eléctricos cada día cobra más relevancia y su aplicación es muy común en todas las actividades diarias, debido al avance de la tecnología.

Tiene una gran importancia en casi todos los sectores de la industria moderna como las telecomunicaciones, la informática, la instrumentación, robótica, medicina, transporte, entre otros.

En el mercado de energía eléctrica la metrología es esencial, pues los medidores de energía son la base para la facturación de las transacciones comerciales entre los participantes del mercado y de los consumos de los usuarios finales.

La eficiencia energética hoy día es primordial para hacer un uso razonable de los recursos naturales, por tanto la metrología eléctrica permite contar con herramientas adecuadas para optimizar los consumos de energía. En la figura 1 se muestran instrumentos de medición eléctrica comunes.

Figura 1. **Ejemplos de instrumentos de medición eléctrica**



Fuente: *Vimelec*. <https://www.vimelec.com.ar/>. Consulta: 23 de noviembre de 2018.

1.2. Proceso de medición

El proceso de medición es el conjunto de operaciones descritas de forma clara y específica, que son utilizadas en la realización de mediciones particulares y que están de acuerdo a un método previamente determinado.

Consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse a una magnitud de manera razonable. Implica una comparación de magnitudes o el conteo de entidades.

1.2.1. Magnitudes

Una magnitud es el atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido por sus cualidades, es decir cualitativamente y se puede cuantificar es decir, se determina cuantitativamente. Son magnitudes por ejemplo: masa, resistencia eléctrica, tensión eléctrica, tiempo, longitud, temperatura.

1.2.2. Sistema de magnitudes

Se obtiene cuando se define un conjunto de magnitudes entre las cuales existen relaciones definidas. Un sistema de magnitudes generalmente está constituido por magnitudes base y magnitudes derivadas. Las magnitudes base son aquellas que se aceptan por convención como funcionalmente independientes unas de otras, en tanto que las magnitudes derivadas se definen en función de las magnitudes base de ese sistema.

1.2.3. Unidad de medida

Una unidad de medida es una magnitud escalar real, definida y adoptada por convenio mediante organismos internacionales, con la que se puede comparar cualquier otra magnitud de la misma naturaleza para expresar la relación entre ambas mediante un número. Las unidades se expresan mediante nombres y símbolos.

El símbolo de una unidad de medida es la representación de la magnitud, generalmente por una letra perteneciente al alfabeto griego o latino. El amperio es la unidad de medida de la corriente eléctrica (A), el voltio de la tensión o potencial eléctrico (V), y el ohmio de la resistencia eléctrica (Ω). En la figura 2 se enlistan las magnitudes y unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades.

Para la medición comercial de energía eléctrica se utiliza la unidad de medida vatio-hora y su símbolo es Wh. Para la medición de potencia eléctrica se utiliza la unidad de medida vatio y su símbolo es W.

Figura 2. **Magnitudes y unidades básicas del Sistema Internacional SI**

Magnitud básica	Símbolo	Unidad básica	Símbolo
longitud	l, h, r, x	metro	m
masa	m	kilogramo	kg
tiempo, duración	t	segundo	s
corriente eléctrica	I, i	amperio	A
temperatura termodinámica	T	kelvin	K
cantidad de sustancia	n	mol	mol
intensidad luminosa	I_v	candela	cd

Fuente: *Centro Español de Metrología*. <https://www.cem.es/content/el-sistema-internacional-de-unidades-si>. Consulta: 25 de noviembre de 2018.

1.2.4. Mediciones

El objetivo principal de una medición es determinar el valor de lo que se desea medir, lo que en metrología se conoce como el mensurando. Al realizar una medición intervienen varios factores que la hacen variar y determinará su resultado, estos pueden ser:

- El lugar en donde se realiza
- Los instrumentos utilizados
- El observador
- El objeto de la medición
- El método utilizado

El principio de medida es el fenómeno que sirve como base de una medición, este fenómeno puede ser de naturaleza física, química o biológica. El método de medida es la descripción genérica de la secuencia lógica de operaciones utilizadas en una medición.

Un procedimiento de medida es la descripción detallada de una medición conforme a uno o más principios y a un método dado, y que incluye los cálculos necesarios para obtener un resultado. El procedimiento habitualmente se documenta con suficiente detalle para que un operador pueda realizar una medición. En la figura 3 se observa la medición de masas.

Figura 3. **Medición de masas**



Fuente: *Laboratorio Nacional de Metrología*. https://cename.gt/wp-content/uploads/2017/03/100_8520.jpg. Consulta: 25 noviembre de 2018.

1.3. Características de las mediciones

La importancia de los instrumentos eléctricos de medición es incalculable, ya que mediante el uso de ellos se miden e indican magnitudes eléctricas, como corriente, carga, potencial y energía, o las características eléctricas de los circuitos, como la resistencia, la capacidad, la capacitancia y la inductancia.

1.3.1. Exactitud

Es la proximidad entre un valor medido y el valor verdadero de la magnitud que se desea medir. Una medición será más exacta cuanto más pequeño sea el error de medida.

1.3.2. Error

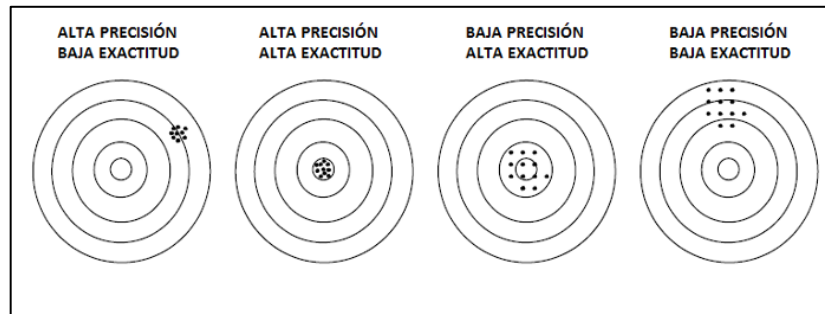
Es la diferencia entre un valor medido y un valor de referencia de una magnitud, es decir la desviación respecto del valor real. Para efectos prácticos se trata de comparar el resultado de un instrumento contra el resultado de otro instrumento de referencia, llamado patrón.

1.3.3. Precisión

Es la proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.

En la figura 4 se muestra un ejemplo práctico que ayuda a entender las diferencias entre exactitud y precisión, pues con conceptos que comúnmente se confunden.

Figura 4. **Representación gráfica de exactitud y precisión**



Fuente: DE LA CRUZ REYES, Luis Antonio. *Mediciones eléctricas*.

<https://ingenieriaelectronica.org/precision-exactitud-y-sensibilidad-mediciones-electricas/>.

Consulta: 20 de noviembre de 2018.

1.3.4. Repetitividad y reproducibilidad

La repetitividad se refiere a la proximidad de los resultados o concordancias de mediciones del mismo mensurando bajo las mismas condiciones y realizadas sucesivamente.

La reproducibilidad es la concordancia o cercanía entre los resultados de mediciones del mismo mensurando en diferentes lugares, por personas diferentes, usando el mismo método de medición en ambientes similares. Puede ser expresada cuantitativamente en términos de las características de dispersión de los resultados.

1.3.5. Magnitud de influencia

Toda magnitud que no es el objeto de la medición pero que tiene un efecto sobre el resultado de la misma se denomina Magnitud de Influencia. Por ejemplo, la temperatura de un conductor influye sobre su resistencia eléctrica

de forma que la medida de dicha resistencia depende de la temperatura del conductor.

Las magnitudes de influencia a considerar son las que resultan significativas en el orden de la magnitud con la que se expresa el mensurando.

1.4. Clasificación de los errores

No es posible realizar una medición perfecta, hay diversos factores que lo impiden y dependiendo de su naturaleza se clasifican los tipos de errores.

1.4.1. Error grueso

Son los atribuibles a una mala operación o una mala lectura del instrumento, son fáciles de detectar y corregir. En general se dice que son debido a errores humanos; las equivocaciones en el registro y cálculo de los datos, selección incorrecta de la escala, ajustes incorrectos también se consideran errores gruesos.

1.4.2. Error sistemático

Aparecen cuando algo afecta a todas las mediciones de una serie en forma igual o consistente. Estos errores se deben principalmente a los instrumentos, al procedimiento de medición o la metodología empleada. Su origen no es completamente conocido por tanto las causas pueden reducirse pero no eliminadas completamente. Partes defectuosas o gastadas del instrumento contribuyen a errores sistemáticos.

1.4.3. Error aleatorio

Cuando los errores sistemáticos han sido ya considerados, el error presente se debe a los errores aleatorios, estos pueden ser producto de variaciones en las magnitudes de influencia y dan origen a las variaciones en observaciones repetidas del mensurando. Este tipo de error cobra importancia cuando se realizan mediciones de alta exactitud.

1.4.4. Error ambiental

Este tipo de error se debe a la influencia de las condiciones ambientales que afecta en el lugar donde se realiza la medición. Puede ser debido a la temperatura, humedad, presión atmosférica, influencia de campo eléctrico o campo magnético. Generalmente el fabricante de los instrumentos especifica las condiciones ambientales límite en que se debe operar.

1.5. Proceso de calibración

Para asegurar que las mediciones sean correctas y lo más cercano posible a los valores reales es necesario la calibración de los instrumentos a utilizar. Por medio de una calibración se tiene la certeza que el instrumento es adecuado y está en condiciones para cumplir su función.

1.5.1. Calibración

Es un conjunto de operaciones que establecen la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento a calibrar, nombrado con fines práctico como IBC y los valores de esa magnitud indicados por el instrumento patrón, asegurando así la trazabilidad de las medidas a las correspondientes

unidades básicas y expresando esta correspondencia por medio de tablas o curvas de corrección, o bien procediendo al ajuste del instrumento.

Figura 5. **Calibración de un medidor de energía eléctrica**



Fuente: Laboratorio Metric. *Metodología, innovación y calidad*. www.metriclaboratorio.com.

Consulta: 30 de noviembre de 2018.

Todo el proceso se debe realizar con las magnitudes de influencia controladas. Para calibrar un instrumento o un patrón es necesario disponer de uno de mayor precisión que proporcione el valor convencionalmente verdadero que es el que se empleará para compararlo con la indicación del instrumento sometido a calibración. En la figura 5 se muestra la calibración de un medidor de energía eléctrica.

1.5.1.1. Recomendaciones previo a la calibración

El instrumento bajo calibración (IBC), debe poseer una identificación única, como número de serie o código de fábrica, en caso contrario es necesario fijar de alguna forma una identificación establecida por el laboratorio. Adicional se debe disponer del manual del fabricante del instrumento.

Es necesario conectar a la red eléctrica tanto el IBC como los patrones a utilizar si es que aplica, para conseguir su estabilización térmica. Este tiempo varía en función del equipo y aparece en su manual de instrucciones.

El IBC debe permanecer en las instalaciones del laboratorio al menos dos horas antes del inicio de la calibración, para que adquiera las condiciones ambientales controladas. Este tiempo puede variar de acuerdo a los estudios de validación de métodos que realice el laboratorio, para encontrar el tiempo óptimo. Se entiende que los patrones permanecen en un mismo lugar dentro del laboratorio todo el tiempo, de lo contrario debe cumplir también este requisito.

El IBC debe estar acompañado de todos los accesorios necesarios para realizar medidas, tales como sensores, transductores, sondas, cables de conexión, cables de alimentación, conectores, entre otros.

Se debe comprobar el estado de calibración de todos los equipos que participan en el proceso, para asegurar convenientemente la trazabilidad de la calibración. Revisar que no tengan golpes o daños, si algún equipo utiliza baterías comprobar el buen estado de las misma. Se recomienda también utilizar una hoja de verificación para anotar todas las observaciones o bien un registro electrónico.

Comprobar que las condiciones de alimentación de la red eléctrica son las adecuadas. Se recomienda utilizar fuente de suministro eléctrico o UPS, lo suficientemente robusto para asegurar un adecuado suministro eléctrico. En la figura 6 se muestra la calibración de un transformador de instrumento para medición.

Figura 6. **Calibración de transformadores de instrumento**



Fuente: Laboratorio Metric. *Metodología, innovación y calidad*. www.metriclaboratorio.com.
Consulta: 30 de noviembre de 2018.

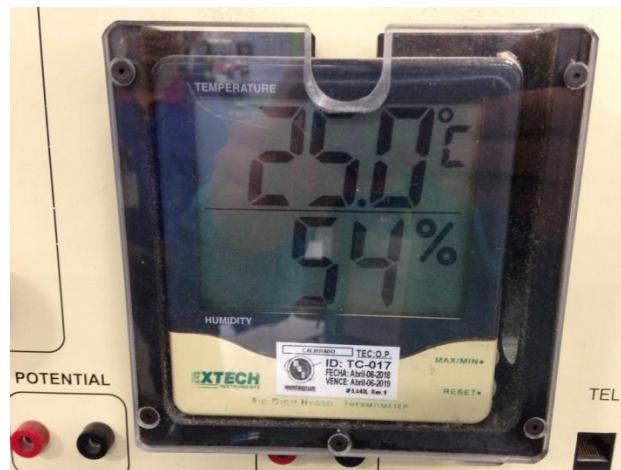
1.5.1.2. Recomendaciones durante la calibración

Tomar nota constantemente de temperatura y humedad, para asegurar el mantenimiento de las condiciones ambientales durante el proceso. Contar un instrumento que guarde los registros de estos parámetros es de gran utilidad.

Tomar 10 medidas simultáneamente del patrón y del IBC, esta cantidad puede variar, pero es un valor suficiente para considerar una distribución normal, esto dependerá tanto del criterio de aceptación como de los estudios de

repetitividad y reproducibilidad que realice el laboratorio. Los valores deben ser registrados o anotados una vez que se haya superado el régimen transitorio.

Figura 7. **Monitor de temperatura y humedad en un laboratorio de calibración**



Fuente: Landis+Gyr. *Reynosa, fábrica de medidores.*

http://www.elnuevoheraldo.com/el_valle/editorial/reynosa-fabricante-reconocido-por-su-excelencia/article_95da4f2f-0de9-5095-83b7-0db29ea67bc3.html. Consulta: 30 de noviembre de 2018.

1.5.1.3. Recomendaciones posteriores a la calibración

Luego de realizadas las operaciones de calibración es recomendable comprobar que todos los datos que se han tomado para cada uno de los puntos de calibración cumplen con el criterio de aceptación. Esta práctica puede ayudar a eliminar datos inconsistentes.

Existen medidas que parecen erróneas, pero para las que no hay explicación racional alguna, no puede descartarse simplemente, ya que puede tratarse de algo implícito al método de medida.

Es necesario contar con un método estadístico que sea capaz de determinar qué datos pueden ser desechados de manera razonable.

1.5.2. Verificación

Una verificación en términos de metrología es la aportación de evidencia objetiva de que un elemento dado satisface los requisitos especificados. El elemento puede ser un proceso, un procedimiento de medida, un material, un compuesto o un sistema de medida. Los requisitos especificados pueden ser las especificaciones del fabricante, una norma o un reglamento.

Por medio de la verificación se confirma que se satisfacen las propiedades de funcionamiento declaradas o los requisitos legales de un sistema de medida. Es un error muy común confundir la calibración con una verificación.

En la evaluación de la conformidad, la verificación puede conllevar al examen, marcado y emisión de un certificado. Una verificación pues implica necesariamente una calibración más una evaluación. En la figura 8 se muestra una actividad de verificación de medidores eléctricos.

Figura 8. **Verificación de medidores de energía eléctrica**



Fuente: Radian Research. *Laboratorio*. <http://radianresearch.com/WEMEET2019.php>. Consulta: 20 de junio de 2019.

1.5.3. Validación

Es una verificación de que los requisitos especificados son adecuados para un uso previsto. Por ejemplo un procedimiento de medida habitualmente utilizado para la calibración de medidores de energía eléctrica electromecánicos, puede también validarse para la calibración de medidores de energía eléctrica digitales.

1.5.4. Incertidumbre

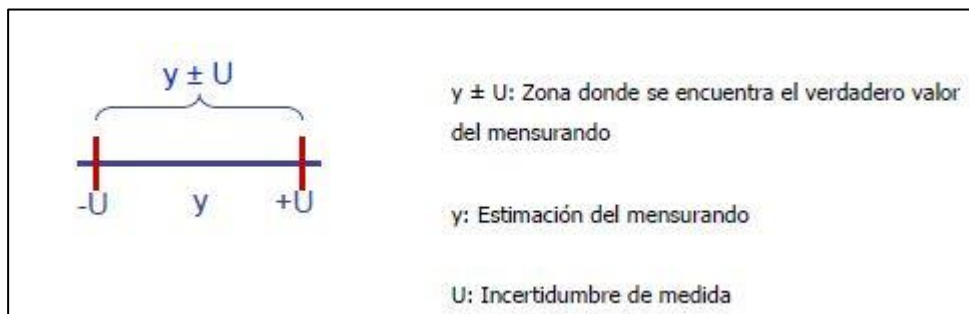
Incertidumbre de medida es un parámetro asociado al resultado de una medición, en la cual se caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente se atribuyen al mensurando, a partir de la información que se utiliza. A la incertidumbre se le atribuye un intervalo de valores donde se supone se encuentra el valor medido. Es un valor no negativo.

A veces es necesario y de utilidad comparar el error de una medida (error total) con el valor de la medición misma, para ello se define la incertidumbre relativa de la medición.

La incertidumbre relativa es muy útil para la redacción de conclusiones parciales y comentar en los resultados de las mediciones. Para expresar el resultado de una medida, de una manera final, es necesario utilizar la incertidumbre absoluta.

Por otro lado, la incertidumbre expresada en forma relativa está dada de forma adimensional, ya que se expresa en tanto por ciento, mientras la absoluta, tiene las mismas unidades de medida que el mesurando. En la figura 9 se muestra la representación gráfica de una medición con su incertidumbre.

Figura 9. **Incertidumbre de una medición**



Fuente: Tcmetrología. *Técnicas de control metrológico, SL*. www.tcmetrología.com. Consulta: 14 de marzo de 2017.

1.5.4.1. **Cálculo de incertidumbre**

La incertidumbre de medida se calcula con aportaciones procedentes de efectos sistemáticos, tales como valores asociados a correcciones o valores

asignados a patrones; también incluye aportaciones debidas a la resolución del instrumento. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.

El Comité Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) redactó la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM), la primera recomendación se resume en tres puntos.

- La incertidumbre de medida puede agruparse en dos categorías
 - Tipo A: Las que se estiman mediante procedimientos estadísticos sobre los valores obtenidos al reiterar medidas de un mesurando. Esto se realiza en sitio con el equipo o sistema de medición.
 - Tipo B: las que se aprecian con otros métodos.
- Ambas componentes deben determinarse mediante varianzas, o equivalente, y covarianzas si aplica.
- La incertidumbre así determinada puede multiplicarse por un factor superior a la unidad, para obtener una incertidumbre total mayor. Es obligatorio indicar el factor utilizado.

En general, para una información dada, se sobreentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mesurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada.

1.5.4.2. Evaluaciones tipo A

Se trata de la contribución de repetitividad, solo se calculan a partir de las medidas realizadas sobre el mesurando en el momento de la calibración. Si se utilizan medidas anteriores, estas serán contribuciones tipo B.

Hay que considerar que cuando se trabaja con muestras poblacionales, generalmente, no se conoce información estadística de la misma o distribución de probabilidad.

La estimación de la media aritmética, ya sea muestral o experimental, viene dada por:

$$\bar{u} \equiv \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Donde:

\bar{u} = media aritmética

x_i = medidas realizadas

n = cantidad de repeticiones

y la estimación de la varianza por:

$$\bar{\sigma}^2 \equiv s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Donde:

$\bar{\sigma}^2$ = varianza

\bar{x} = media aritmética

x_i = medidas realizadas

n = cantidad de repeticiones

La raíz cuadrada de la expresión anterior corresponde a la desviación típica experimental.

La desviación típica de la media está dada por:

$$u(x) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde:

$u(x)$ = incertidumbre

s = desviación típica de la media

n = cantidad de repeticiones

Los grados de libertad asociados a s y $u(x)$ viene dado por $n - 1$, los grados de libertad provienen de una muestra de n valores y un valor dependiente de los mismos.

1.5.4.3. Evaluaciones tipo B

Son contribuciones que se deben valorar con base a la experiencia y el buen juicio, se debe tener un gran conocimiento del comportamiento de esa variable. La dificultad reside en formular una hipótesis adecuada para evaluarlas. En la GUM hay pautas para evaluar este tipo de contribuciones.

Una práctica habitual consiste en considerar que la contribución sigue una determinada distribución de probabilidad y determinar los parámetros de la misma con base a las fórmulas anteriores. Si se evalúan correctamente son muy seguras, por lo que tienen infinitos grados de libertad.

1.5.4.4. Propagación de incertidumbres

La manera de proceder convencional en un laboratorio de calibración debe seguir el procedimiento recomendado por la GUM de propagación de varianzas. Para aplicarlo es necesario:

- Determinar la función modelo
- Determinar valor estimado y desviación típica para cada variable de entrada.
- Calcular covarianzas entre las variables de entrada.
- Indicar los grados de libertad de las desviaciones típicas, esto indica la confianza en los valores de desviación.
- Calcular el mesurando a determinar o variable de salida.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Donde:

y = mesurando

x_1, x_2, \dots, x_n = variables de entrada

- Utilizar la ley de propagación de varianzas.

$$u^2(y) = \left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)^2 u^2(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right)^2 u^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n}\right)^2 u^2(x_n)$$

Esta función es válida siempre y cuando las variables no tengan correlación, es decir que no es necesario tener en cuenta las covarianzas entre ellas, y si la función modelo se puede asumir como lineal en torno al punto de trabajo, lo que se cumple en prácticamente todas las aplicaciones industriales. Lo ideal es evitar siempre las correlaciones.

La incertidumbre puede multiplicarse por un factor superior a la unidad, con tal de obtener una incertidumbre total mayor. Es obligatorio indicar el factor utilizado.

Con las leyes anteriores se obtiene la incertidumbre típica compuesta, y al multiplicar esta por el factor de cobertura (k), se obtiene la incertidumbre expandida.

$$U(y) = ku(y)$$

Donde:

$U(y)$ = incertidumbre expandida

k = factor de cobertura

$u(y)$ = incertidumbre típica compuesta

La incertidumbre expandida se indica con letra minúscula. El resultado de una medida se expresa de la siguiente manera:

$$y \pm U(y) = y \pm ku(y)$$

Esta incertidumbre establece un intervalo donde razonablemente se sitúan una cantidad importante de valores que podrían atribuirse al mensurando. A este intervalo se le asocia una probabilidad de cobertura. Normalmente se selecciona un factor k tal que la probabilidad es del 95 %.

El valor k dependerá de la distribución que caracteriza al mensurando y a la probabilidad deseada. Si se combinan un número suficiente de variables de entrada, el teorema central del límite indica que la magnitud de salida se comportará según una distribución normal. Esta condición se cumple si las contribuciones dominantes (su peso supera un 30 % de la contribución del resto) son tres o más variables de entrada.

En este caso, que se da habitualmente en la práctica, se obtiene una probabilidad de cobertura de 95 % con un factor $k = 2$.

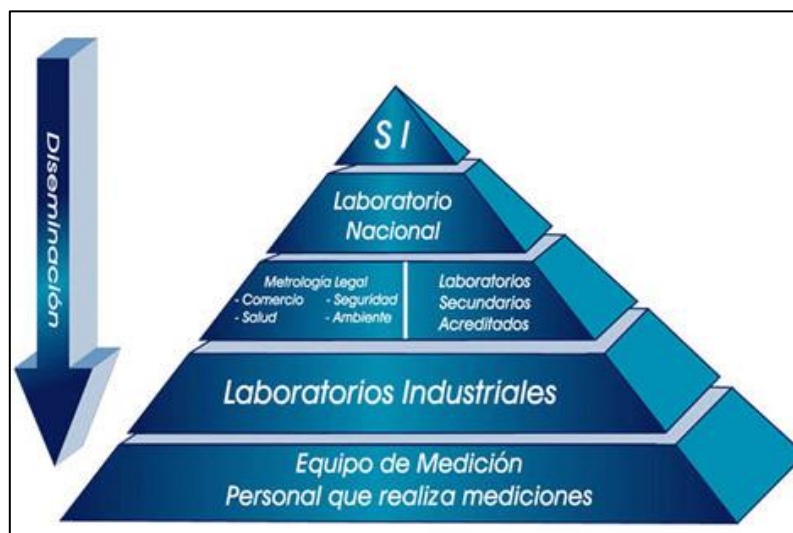
1.5.5. Trazabilidad

Es la propiedad del resultado de las mediciones efectuadas por un instrumento o por un patrón, tal que puede relacionarse con patrones nacionales o internacionales por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo en cuenta todas las incertidumbres determinadas.

La trazabilidad metrológica requiere una jerarquía de calibración establecida. Una medición tendrá trazabilidad hacia un patrón de mayor jerarquía, y por el contrario cuando un patrón se utiliza para calibrar otros instrumentos se le llama diseminación.

La comparación entre dos patrones de medida puede considerarse como una calibración si ésta se utiliza para comprobar, y si procede, corregir el valor y la incertidumbre atribuidos a uno de los patrones. En la figura 10 se muestra una estructura de trazabilidad dónde la jerarquía más alta la tiene el Sistema Internacional de Medidas, luego están los patrones nacionales, luego los laboratorios secundarios acreditados y los laboratorios de metrología legal, luego están los laboratorios industriales y por último los equipos de medición.

Figura 10. **Estructura de trazabilidad**



Fuente: Qualitat. *Trazabilidad*. <http://www.qualitat.cc/id46.html>. Consulta: 25 de noviembre de 2018.

1.5.6. Patrones de medición

Es un instrumento de medición, un material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar o reproducir ya sea una unidad o bien, uno o más valores de una magnitud para utilizarse como referencia y que sirvan de comparación a otros elementos de medida.

Los patrones no cambian su valor nunca, ciertamente han ido evolucionando para que no dependa de una unidad que se encuentre en algún lugar, sino de una constante en la que el ser humano no pueda tener opción a variarla, o que ésta pierda sus propiedades con el transcurrir del tiempo.

Un patrón se utiliza frecuentemente como referencia para obtener valores medidos e incertidumbres de medida asociadas para otras magnitudes de la misma naturaleza, estableciendo así la trazabilidad metrológica, mediante calibración de otros patrones, instrumentos o sistemas de medida.

La incertidumbre típica asociada a un patrón es siempre un componente de la incertidumbre típica combinada de un resultado de medida obtenido utilizando el patrón. Esta componente suele ser pequeña comparada con otras componentes de la incertidumbre típica combinada.

De acuerdo a su jurisdicción los patrones pueden clasificarse en patrón nacional o patrón internacional. De acuerdo a su jerarquía metrológica los patrones se clasifican en patrón primario, secundario, de referencia o de trabajo.

1.5.6.1. Patrón internacional

Es un patrón reconocido por los firmantes de un acuerdo internacional con la intención de ser utilizado mundialmente. Son definidos para utilizarse como base para asignar valores a otros patrones de la magnitud concerniente. Representan unidades de medida cuyo valor es de la mayor exactitud permisible, de acuerdo a los avances tecnológicos en la industria.

Son evaluados y verificados de manera periódica de acuerdo a mediciones absolutas en términos de las unidades fundamentales. En la figura 11 se muestra una foto del patrón internacional de masa.

Figura 11. **Patrón internacional de masa**



Fuente: Centro Español de Metrología. *Sistema internacional de unidades*.
<https://www.cem.es/content/el-sistema-internacional-de-unidades-si>. Consulta: 25 de noviembre de 2018.

1.5.6.2. Patrón nacional

Es un patrón reconocido por una autoridad nacional en cada país, para servir en la economía, como base para la asignación de valores a otros patrones de magnitudes de la misma naturaleza. Se refieren a patrones internacionales o se inter compara con otros patrones nacionales de otros países. En la figura 12 se muestra una mesa de calibración para múltiples

posiciones en el Centro Nacional de Metrología, donde actualmente se está preparando el patrón nacional para medición de energía eléctrica.

Figura 12. **Mesa de calibración de medidores de energía de múltiples posiciones**



Fuente: elaboración propia.

1.5.6.3. Patrón primario

Es un patrón que es designado o ampliamente reconocido como poseedor de las más altas cualidades metrológicas y cuyo valor se acepta sin referirse a otros patrones de la misma magnitud. En la figura 13 se muestra un modelo de patrón de energía que usualmente se utiliza como patrón primario en distintos laboratorios.

Figura 13. **Patrón primario de transferencia para energía eléctrica**



Fuente: Radian Research Inc. *Dytronic primario*. <http://www.radianresearch.com/brochures/RD-22.pdf>. Consulta: 23 de noviembre de 2018.

1.5.6.4. Patrón secundario

Es un patrón cuyo valor se establece por comparación con un patrón primario de la misma magnitud. En la figura 14 se muestra un modelo de patrón que se utiliza frecuentemente como patrón secundario.

Figura 14. **Patrón secundario de energía eléctrica**



Fuente: Radian Research. *Dytronic trifásico*. <http://www.radianresearch.com/brochures/RD-31.pdf>. Consulta: 23 de noviembre de 2018.

La calibración puede efectuarse directamente entre el patrón primario y el patrón secundario, o a través de un sistema de medida intermedio calibrado por el patrón primario, que asigna un resultado de medida al patrón secundario.

1.5.6.5. Patrón de referencia

Es el patrón de más alta calidad y exactitud disponible en un lugar dado o en una organización del cual se derivan las mediciones realizadas en dicho lugar, es decir con este patrón de referencia se calibran los patrones de trabajo.

1.5.6.6. Patrón de trabajo

Es el patrón que se utiliza rutinariamente para calibrar o controlar medidas materializadas, instrumentos de medición o los materiales de referencia, se calibra usualmente contra un patrón de referencia. En la figura 15 se muestra un patrón de trabajo y se utiliza para verificar medidores de energía eléctrica.

Figura 15. **Patrón de trabajo para verificar medidores de energía eléctrica**



Fuente: Radian Research. *Medidor de energía eléctrica*. Laboratorio.
<http://www.radianresearch.com/search.html?q=rm-17>. Consulta: 23 de noviembre de 2018.

1.5.7. Competencia técnica

Los laboratorios que realizan procedimientos de calibración deben demostrar competencia técnica, no solo del equipo sino del personal que labora principalmente. Esta competencia significa que se está utilizando los equipos adecuados, debidamente calibrados y verificados, demostrar la trazabilidad de sus instrumentos, tener respaldo de la declaración de incertidumbre y que las personas que se dedican a las actividades de calibración hayan sido capacitadas adecuadamente.

Adicional es importante que el laboratorio presente evidencia de la validación de métodos, para asegurar que dentro de los procedimientos se utiliza una metodología adecuada.

Al operar bajo normas internacionalmente reconocidas un laboratorio demuestra esta competencia técnica.

2. MEDIDORES DE ENERGÍA Y POTENCIA ELÉCTRICA

En este capítulo se describe las características, tipos y formas de operación de medidores de energía eléctrica, principalmente de los que se utilizan para la medición de la energía con fines comerciales a nivel nacional.

2.1. Principio de funcionamiento de medidores de estado sólido

Los medidores de energía eléctrica de estado sólido se basan en el procesamiento digital de señales de corriente y tensión eléctrica que llegan a través de un convertidor análogo-digital que es alimentado por los transductores de corriente y tensión.

Además contiene un micro controlador que calcula la potencia y emite un pulso de salida que es proporcional a la potencia medida, guarda un registro digital de los diversos parámetros en una memoria del circuito integrado, los valores medidos se pueden observar en una pantalla de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés), conocido comúnmente como display.

Generalmente los medidores tienen cargado un software programable y tiene diversos niveles y perfiles de seguridad para proteger la integridad de los datos del registro.

2.2. Medidores multifunción

Los medidores llamados multifunción generalmente son capaces de medir y registrar diversos parámetros además de la energía y potencia, energía

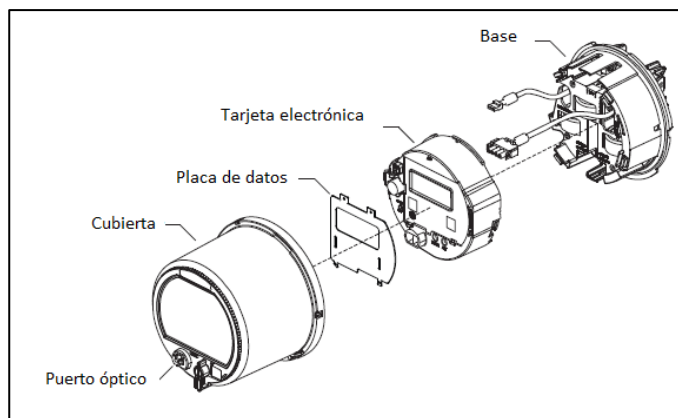
reactiva, tensión, corriente, ángulos de fase, demanda máxima, factor de potencia, distorsión armónica, entre otros. Adicionalmente la mayoría despliegan alertas, diagnósticos y errores.

2.3. Principales partes de un medidor

Un medidor de energía eléctrica electrónico se compone principalmente de las bobinas de corriente, las señales de voltaje, convertidor análogo a digital, micro controlador, pantalla LCD, reloj oscilador, memoria eprom, tarjeta o módulo de comunicación, puerto óptico, base y cubierta de policarbonato.

La exactitud que pueda presentar un medidor va ser principalmente en función de la calidad de los transductores de corriente, estos pueden ser de tipo derivación o de tipo bobina. Generalmente los de tipo bobina presentan una mejor calidad en cuanto a la exactitud. En la figura 16 se muestran las partes principales de un medidor de energía eléctrica.

Figura 16. Principales componentes de un medidor de energía eléctrica



Fuente: Elster, manual técnico A3, *manual conexiones, uso METERCAT y configuración TIBBO*.

2.4. Tipos de medidores

En el mercado existen diferentes tipos de medidores de estado sólido desde un vatímetro simple (magnitud de energía eléctrica) hasta medidores con calidad de potencia y comunicaciones. En la actualidad ya no se fabrican medidores electromecánicos y la tendencia en el uso de medidores es enfocada a Smart grid.

El principio de funcionamiento es el mismo para todos los medidores y lo que va variando es la calidad de sus componentes sobre todo en cuanto a la calidad de los transductores de tensión y corriente, la capacidad de memoria y la capacidad de comunicaciones.

Los tipos de medidores se pueden clasificar de acuerdo a los parámetros de medición, el uso, el nivel de tensión de servicio, el número de fases, la forma de conexión, pero principalmente por su clase de exactitud.

2.5. Clasificación de medidores

Los medidores se clasifican de acuerdo a su uso y servicio, por su forma de construcción, por su forma de conexión y número de fases y por su clase de corriente.

2.5.1. Por su uso o servicio

Según su uso la mayoría de fabricantes los clasifican como medidores residenciales, medidores industriales o multifunción, medidores AMI y medidores de calidad de potencia.

2.5.1.1. Medidores residenciales

Registran únicamente energía activa acumulada en kwh y básicamente son contadores de energía utilizados con fines de facturación únicamente. En la figura 17 se muestra un medidor comúnmente utilizado para la medición de energía eléctrica en residencias.

Figura 17. **Medidor de estado sólido para uso residencial**



Fuente: ANSI. *Star instrument*. <https://www.szstar.com/Products/ANSI-Meters/index.html>.

Consulta: 28 de noviembre de 2018.

2.5.1.2. Medidores industriales

Registran además de la energía activa en kwh, demanda máxima en kw y energía reactiva en kvarh, que son los principales parámetros de facturación, estos son los llamados medidores multifunción y dependiendo del fabricante registran y despliegan diversidad de parámetros, perfil de carga y bandas horarias. En la figura 18 se muestra un ejemplo de medidor utilizado para comercio e industria.

Figura 18. **Medidor de estado sólido para uso comercial e industrial**



Fuente: Aclara technologies. *Productos y servicios*. <https://www.aclara.com/products-and-services/smart-meters/ansi-commercial/kv2c-and-kv2c/>. Consulta: 28 de noviembre de 2018.

2.5.1.3. Medidores AMI

Estos pueden ser tanto del segmento residencial como industrial y la característica principal es que se conectan a una red Smart Grid o infraestructura de medición avanzada (AMI por sus sigla en inglés) a través de puertos de comunicación que pueden ser diversos como radiofrecuencia, serial RS-232, PLC, GPRS o Ethernet. En la figura 19 se muestra un medidor con capacidades de comunicación utilizado en redes AMI.

Figura 19. **Medidor de estado sólido con tecnología AMI**



Fuente: Reynosa, Landis+Gyr. *Productos*. <https://www.environmental-expert.com/products/model-e650-s4x>. Consulta: 28 de noviembre de 2018.

2.5.1.4. Medidores de calidad de potencia

Estos medidores tienen características adicionales a los industriales e incluyen medición de parámetros de calidad de potencia, componentes armónicos de las señales de tensión y de corriente, coeficientes de distorsión armónica, micro cortes. Son utilizados para grandes usuarios, en puntos de intercambio de energía, salida de circuitos en sub estaciones de distribución, líneas de transmisión y generadores. En la figura 20 se muestra un medidor utilizado para medir parámetros de calidad de potencia.

Figura 20. **Medidor de energía con parámetros de calidad de potencia**



Fuente: Schneider Electric. *Medidores compactos de energía y calidad de energía para alimentadores o cargas críticas*. <https://www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/63502-powerlogic-ion7400/>. Consulta: 28 de noviembre de 2018.

2.5.2. Por su forma de construcción

De acuerdo a la forma de construcción y al principio de funcionamiento los medidores pueden ser de componentes electromecánicos o componentes de estado sólido, comúnmente llamados digitales.

2.5.2.1. Medidores electromecánicos

Actualmente ya no se fabrican, pero se encuentra gran cantidad en servicio, su tiempo promedio de vida es de 30 años. Su principio de funcionamiento es básicamente un motor de inducción que hace girar un disco y en su eje tiene un tornillo sin fin que va moviendo un tren de engranes que componen el registro. El movimiento de los engranajes hace girar las agujas sobre un dial y la lectura mostrada es la cantidad de energía en kwh. En la figura 21 se muestra un medidor electromecánico para uso monofásico.

Figura 21. Medidor electromecánico monofásico



Fuente: Aquito Solar. *Medidor electrico 220v monofasico kwh calibrado.*

<http://www.aquitosolar.cl/medidores-energia-solar/588-KWH220V.html>. Consulta: 2 de diciembre de 2019.

2.5.2.2. Medidores de estado sólido

También llamados medidores digitales o electrónicos. Tienen la ventaja sobre los electromecánicos que no tienen partes móviles, por tanto su

funcionamiento no se ve afectado por la posición o por desgaste tal como sucede con los medidores electromecánicos.

2.5.3. Por su forma de conexión y número de fases

La forma de conexión se refiere a la posición física en que los cables de alimentación se conectan a las clavijas o terminales del medidor, así como el número de fases y cantidad de conductores, comúnmente llamados hilos. A continuación se describe las características de cada forma.

2.5.3.1. Medidores monofásicos

En Guatemala las formas de conexión más comunes en servicios monofásicos son la 1S para servicio 120V dos hilos y la forma 2S para servicios 120/240 V tres hilos. La letra S significa conexión tipo socket. Las formas para medidores de sobre poner son 1A para servicios 120V un hilo y la 2A para servicios 120/240V tres hilos.

2.5.3.2. Medidores trifásicos

La forma más común de conexión para servicios trifásicos son 14S, 15S, 6S, 9S y 16S.

- Forma 14S para servicios trifásicos de cuatro hilos conectados en estrella, con tres elementos de corriente y tres elementos de voltaje.
- Forma 15S para servicios trifásicos conectados en configuración delta, puede ser de tres o cuatro hilos dependiendo si tiene conectado el neutral. Usa tres elementos de corriente y dos elementos de voltaje.

- Forma 16S para servicios trifásicos de 4 hilos, dado que utiliza tres elementos de corriente y tres elementos de voltaje independientes esta forma puede ser equivalente tanto para el 15S como el 14S.
- Forma 9S, para servicios trifásicos de cuatro hilos con medición indirecta, pues utiliza transformadores de instrumento, con tres elementos de corriente y tres elementos de voltaje.
- Forma 6S, para servicios trifásicos de cuatro hilos con medición indirecta, pero a diferencia de la forma 9S este utiliza tres elementos de corriente y solo dos elementos de voltaje.

Actualmente las formas 9S y 16S son las que predominan, dado que la regulación exige la utilización de mediciones de tres elementos, por tanto las formas 14S, 15S y 6S se han dejado de utilizar.

2.5.3.3. Medidores tipo network

Son medidores para servicios monofásicos pero con la particularidad que son alimentados por un banco de transformación trifásico en estrella, por tanto utilizan dos fases. Generalmente la tensión de servicio es 120/208V tres hilos. Las formas de conexión más populares para este tipo de conexión son las 12S y 25S.

2.5.4. Por su clase de corriente

Los medidores de acuerdo a la cantidad de corriente que son capaces de soportar se clasifican de acuerdo a la clase de corriente.

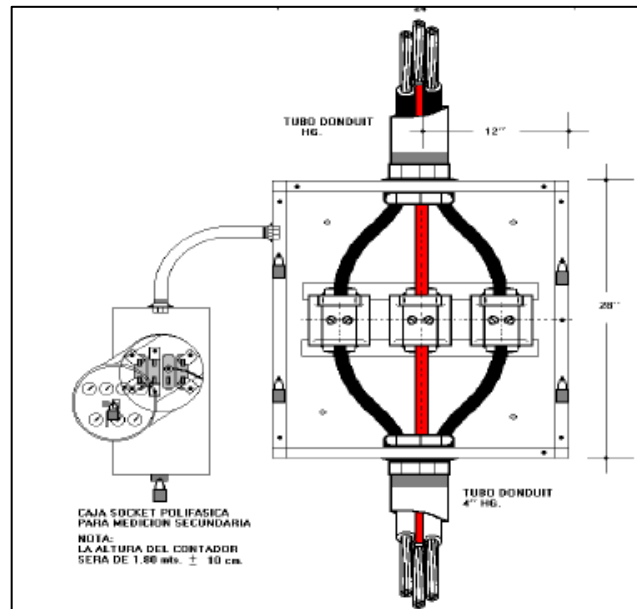
2.5.4.1. Medición directa

Cuando únicamente se utiliza el medidor y este se conecta directamente a la red de distribución se llama medición directa o auto contenida. La clase de corriente puede ser 100 o 200. Este dato generalmente va especificado en la placa de datos del medidor. Significa que por cada bobina de corriente el medidor va soportar como máximo la corriente indicada en la clase es decir, 100 A para los clase 100 y 200 A para los clase 200. Esta es la razón por la que en servicio monofásico se sirve hasta un máximo de 48 kw.

2.5.4.2. Medición Semi indirecta

Cuando la corriente de carga a medir supera los 200 Amperios por línea o por fase es necesario además del medidor, utilizar transformadores de instrumento, y de esta manera al medidor le llega una corriente proporcional a la corriente medida, por lo que a la lectura indicada deberá agregarse un factor multiplicador que va estar definido por la relación de transformación de los transformadores de corriente utilizados.

Figura 22. **Medición secundaria en caja tipo III**



Fuente: CNEE. *Norma técnica.*

<http://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/NORMA%20EEGSA.pdf>.

Consulta: 2 de diciembre de 2018.

Para estos casos generalmente se utiliza los medidores clase 20, lo cual significa que la corriente máxima que podrán soportar estos medidores son 20 A en cada línea o fase. Las señales de tensión se obtienen directamente de la red, de ahí el nombre de semi indirecta.

En la figura 22 se muestra una caja tipo III que se utiliza para alojar los transformadores de corriente en baja tensión, los conductores de acometida funcionan como el primario y el circuito secundario de los transformadores se conecta hacia los bornes del medidor.

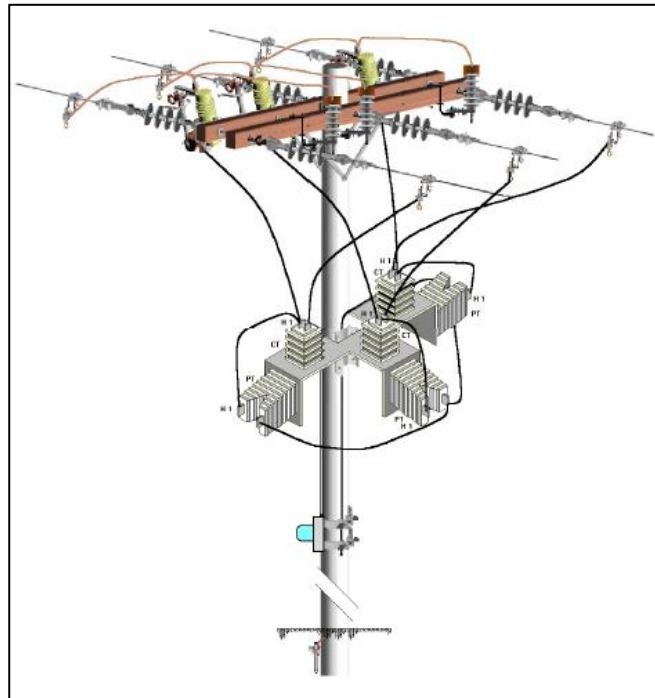
2.5.4.3. Medición indirecta

Para la medición de energía en media o alta tensión es indispensable utilizar tanto transformadores de corriente como transformadores de tensión, que permiten aislar el nivel de tensión de la red a niveles que soporte el medidor. Las señales de corriente y voltaje entonces son suministradas al medidor a través de los circuitos secundarios de los transformadores de corriente y tensión, con un valor proporcional a los valores reales.

Para estos casos también es la clase 20 la más utilizada, y los transformadores de corriente son especificados para obtener 5 A o 1A en el circuito secundario para carga nominal, dependiendo de las especificaciones de diseño.

En la figura 23 se muestra una medición primaria, y se compone de tres transformadores de corriente y tres transformadores de potencial en una configuración de paso, cuando se desea medir el ramal en media tensión. Una configuración de remate se utiliza cuando se desea medir el circuito de una bajada primaria.

Figura 23. **Medición primaria en media tensión**



Fuente: CNEE. *Norma técnica.*

<http://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/NORMA%20EEGSA.pdf>.

Consulta: 2 de diciembre de 2018.

2.5.5. Por su clase de exactitud

Es importante la definición de la clase de exactitud de los medidores porque esto garantiza que tan cercano es la medición respecto al valor real. La clase de exactitud se define en términos del porcentaje del error de medición respecto al valor real, así mientras más cercano a cero sea el valor de clase de exactitud, más exacto será el medidor. Para medidores electromecánicos generalmente las clases de exactitud son de 1 % y 2 %, mientras que para medidores de estado sólido la clase de exactitud puede ser 2 %, 1 %, 0,5 %, 0,2 % y 0,1 %.

El costo de los medidores se incrementará conforme tenga una clase de exactitud más alta, es decir un error cercano a cero, dado que se necesitan componentes más estables y transductores de mayor calidad.

Las normas internacionales definen los requisitos que deben cumplir los medidores para cada nivel de exactitud. Las instituciones reguladoras del sector eléctrico definirán la clase de exactitud de medidores que debe utilizarse para cada aplicación.

2.6. Características de medidores

Es importante conocer las características y los parámetros de los medidores para poder operarlos de forma adecuada, adicional es importante especificar de forma correcta estas características cuando se va realizar compra de medidores. Estas características aparecen en la placa de datos del medidor.

2.6.1. Rango de tensión

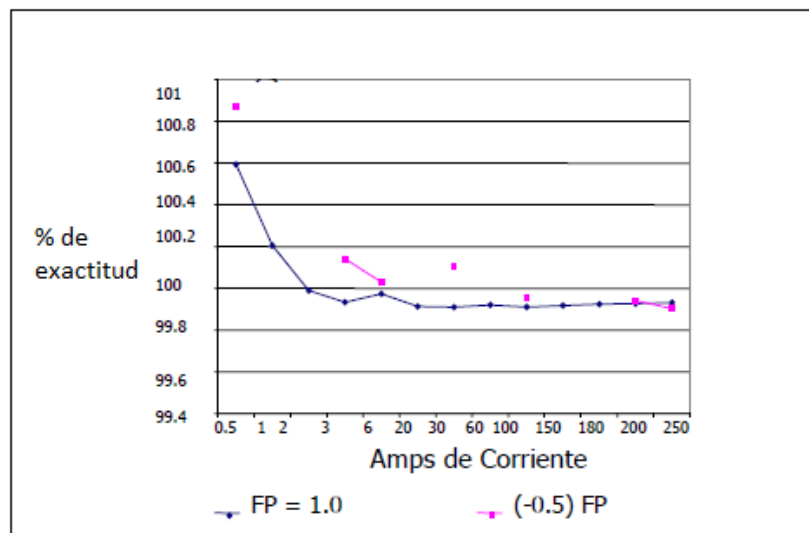
Es el nivel de tensión eléctrica para el cual el medidor fue diseñado y debe operar. Hay medidores que son diseñados para operar en un rango amplio de tensión en estos casos se especifica el nivel de tensión más bajo y el más alto separados por un guión.

Si se especifica únicamente un valor de tensión, no debe operarse dicho medidor en otro valor pues puede dañarse o registrar un valor incorrecto o fuera de exactitud.

2.6.2. Corriente de prueba

Esta corriente de prueba generalmente es el punto de base para las diferentes pruebas de rutina del medidor. Es la corriente de diseño del medidor y en este punto el medidor va a presentar un mejor desempeño en cuanto a exactitud. En la figura 24 se representa la variación de la exactitud de un medidor cuando se varía la corriente de prueba en todo su rango de operación.

Figura 24. Curva de carga típica para un medidor con exactitud 0,2 %



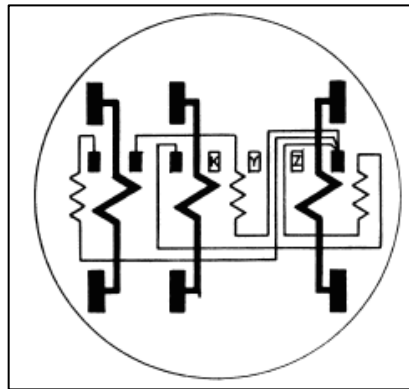
Fuente: LandisGyr. *Manual técnico E350 Focus AX-SD*. p. 88.

2.6.3. Forma de conexión

Este dato especifica la forma como se debe conectar el medidor a la red, la cantidad de alambres, así como si debe utilizarse transformadores de instrumento. Hay medidores que tienen la versatilidad de adaptarse a diferentes formas ya sea cambiando las terminales de posición o bien por medio de

software. En la figura 25 se muestra el esquema de conexión para un medidor con forma 9S.

Figura 25. **Esquema de conexión interna para forma 9S**



Fuente: Edison Electric Institute. EEI. *Handbook for Electricity Metering*. p. 115.

2.6.4. **Constantes K_h , K_t , K_d**

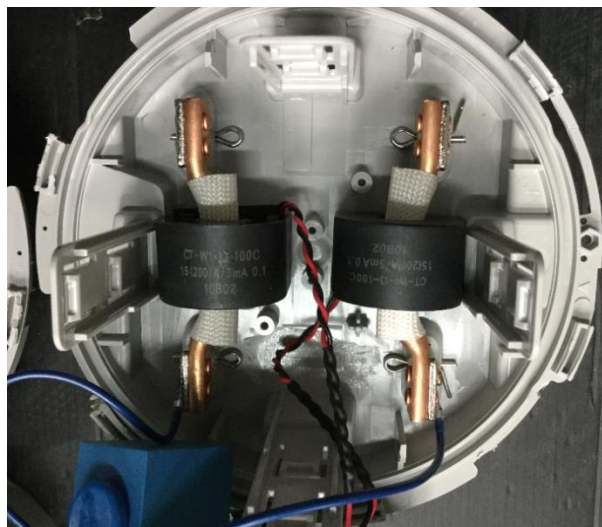
Estas constantes significan la cantidad de energía expresada en Wh que corresponde a cada pulso de salida del medidor (K_t) o a cada revolución del disco para el caso de medidores electromecánicos (K_h). En algunos medidores electrónicos este valor puede programarse o modificarse para obtener salidas de pulso más rápido (K_d). Este valor es importante para la calibración del instrumento, pues debe ser especificado en el medidor patrón a utilizar.

2.6.5. **Bobinas de corriente**

A través de estas fluye la corriente de carga que se está midiendo, las clavijas del medidor generalmente son una prolongación de la misma bobina. En los medidores electromecánicos la bobina de corriente se enrolla en el

núcleo magnético y en el caso de los electrónicos en la bobina de corriente se instalan los transductores de corriente tipo devanado o los sensores tipo derivación. En la figura 26 se muestra un ejemplo de las bobinas de corriente de un medidor.

Figura 26. **Bobina de corriente con transductor tipo devanado**



Fuente: fábrica de medidores Star Instrument. Shenzhen, China.

2.6.6. Tarjeta de medición

Junto con los transductores de corriente y tensión, esta es la principal parte del medidor. Es una tarjeta impresa con todos los componentes electrónicos; en ella se encuentra el convertidor análogodigital, la memoria Eprom, y el micro controlador que tiene las funciones de medición. En la figura 27 se muestra la tarjeta de medición de un medidor de energía monofásico.

Figura 27. **Tarjeta de medición**



Fuente: Laboratorio Metric.

2.6.7. Tarjeta de comunicación

Cuando los medidores cuentan con capacidad de comunicación, poseen una tarjeta modular en el interior y cumplen con protocolos y estándares de comunicación específicos. Las formas de comunicación más comunes es con tarjeta RS-232, RS-485, GPRS, 4G, Radio frecuencia o Ethernet.

Las tarjetas de comunicación tienen la característica de ser intercambiables y se pueden adaptar de acuerdo a la red de comunicaciones que esté disponible en el lugar de operación.

El cumplimiento de protocolos y estándares internacionales permite que puedan utilizarse medidores y tarjetas de comunicación de diversas marcas, así como la comunicación e integración de medidores electrónicos a otros dispositivos de medición o control. En la figura 28 se muestra la foto de un

medidor con varias opciones de comunicación típica para medidores con telemedida.

Figura 28. **Medidor con tarjeta de comunicación**



Fuente: Laboratorio Metric.

2.6.8. Salida de relé

La salida de relé es una opción que permite pulsos de salida y entrada que son programados y ajustados para determinadas condiciones de medición y para integrarse con otros dispositivos. De la misma forma que la tarjeta de comunicación, se encuentra dentro del medidor por separado en forma modular. En la figura 29 se muestra la tarjeta de entradas/salida de un medidor con esta aplicación.

Figura 29. **Medidor con tarjeta de opciones entrada/salida**



Fuente: Laboratorio Metric.

2.7. Modo de operación

Los medidores pueden operar en varios modos, el modo de operación se refiere al estado actual en que se encuentra el medidor cuando está en servicio.

En cada modo de operación se puede personalizar no solo la visualización de los parámetros, sino la forma en que se mide la energía y la forma en que se almacenan los registros de medición. A continuación se describen los modos usuales.

2.7.1. Modo normal

Es el modo usual y para el cual ha sido programado el medidor. En pantalla generalmente despliega las métricas que son objeto de facturación en forma cíclica en una secuencia determinada. El tiempo que dura cada pantalla

se define al programarlo. La visualización en modo normal permite al consumidor observar y monitorear las lecturas de sus consumos.

2.7.2. Modo de prueba

El modo de prueba o test sirve para realizar pruebas de calibración y verificación. La energía que observa el medidor en este modo no se acumula en los registros. Para acceder a este modo debe accionarse un interruptor dentro del medidor, por lo que es necesario retirar la cubierta y los precintos.

Dado que este modo es para realizar pruebas, puede programarse parámetros diferentes al modo de operación normal, como el tiempo de integración de la demanda máxima, la constante Kh, entre otros.

Figura 30. Indicador de modo de operación en un medidor



Fuente: Elster. *Manual técnico A3*. p. 83.

2.7.3. Modo alterno

El modo alterno de operación sirve para desplegar en pantalla otros parámetros que no están definidos en el modo normal y sirve principalmente para la inspección y verificación de las condiciones de suministro por parte de

los técnicos de la empresa distribuidora, así como parámetros de seguridad del medidor.

En la figura 30 se muestra la indicación en pantalla de un medidor cuando se encuentra en modo de prueba (TEST), o en modo de despliegue alguno (ALT).

2.7.4. Modo diagnóstico

En este modo de operación el medidor muestra las alertas y diagnósticos de servicio que han sido detectados a lo largo de la operación normal. Estos diagnósticos son programados previos a su instalación y son de utilidad para mostrar condiciones fuera de lo normal, fallas del servicio, eventos transitorios, calidad de potencia, entre otros.

2.8. Transformadores de instrumento

Son instrumentos utilizados para reducir tensiones y corrientes a niveles adecuados en instrumentos, medidores de energía y protecciones. El principio de operación es el mismo que lo transformadores de potencia. Los niveles de tensión y corriente en instrumentos de medición generalmente son 120 V y 5 A.

Según su utilización los transformadores de instrumento pueden ser de medición o de protección, no se recomienda el uso de transformadores de medida en protección y viceversa.

2.8.1. Transformadores de corriente

Son instrumentos utilizados para medir la corriente de manera que en el secundario del instrumento circulará una corriente proporcional a la corriente primaria, de acuerdo a la relación de transformación y al error de exactitud tanto en magnitud como en ángulo de fase.

En medición de energía eléctrica por lo general, se utilizan para medir cargas arriba de 200 Amperios por fase. Se diseñan para tener una corriente nominal en el secundario de 5 A o 1 A según la norma bajo la cual son construidos. En la figura 31 se muestran imágenes de transformadores de corriente.

Figura 31. Transformadores de corriente tipo devanado y tipo ventana.



Fuente: ABB. Manual técnico guía de transformadores de instrumento.

Según la forma de construcción pueden ser tipo ventana, tipo barra o tipo arrollamiento. Según su lugar de utilización pueden ser para interior o exterior.

Los transformadores de corriente deben operar en la parte lineal de su curva de excitación y la exactitud según el tipo de normativa va desde un 10 % hasta un 110 % de la corriente nominal. No se recomienda utilizar transformadores de medición en saturación porque la exactitud decae considerablemente.

Las relaciones de transformación más comunes para transformadores de corriente son:

- 25:5
- 50:5
- 100:5
- 200:5
- 400:5
- 600:5

Donde el primer número significa la corriente que debe circular en el devanado primario para que en el devanado secundario circule una corriente de 5 A.

2.8.2. Transformadores de potencial

Los transformadores de potencial se utilizan para reducir niveles de tensión eléctrica del sistema a niveles aptos para los aparatos de medición, protecciones y demás instrumentos.

Sirven de aislamiento entre la media o alta tensión y los sistemas de medida. Pueden estar conectados de fase a fase o de fase a tierra según la configuración del sistema.

En el circuito secundario se obtiene una tensión proporcional a la tensión en el primario de acuerdo a la relación de transformación y a la clase de exactitud.

Los transformadores de potencial están especificados para operar desde un 80 % hasta un 120 % de su valor nominal. En la figura 32 se muestra un transformador de potencial para media tensión.

Figura 32. **Transformador de potencial para medición**



Fuente: ABB. Manual técnico guía de transformadores de instrumento.

2.8.3. Burden

Ese término es utilizado para nombrar la carga en el secundario de los transformadores de instrumento para evitar confusión al referirse a la carga que se está midiendo o controlando.

Es decir es la carga que ve el circuito secundario del transformador, por tanto se mide en voltioamperio (VA) o en Ohms (Ω).

El burden está conformado por el conjunto de medidores, instrumentos y cables que están conectados al secundario del instrumento. Por ello es importante la impedancia que representan los medidores y la distancia a la que están ubicados respecto a los transformadores de instrumento.

La especificación del burden incide en el costo del transformador de instrumento, así un burden mayor implica un transformador más caro. La especificación de burden se encuentra normalizado con una letra y su correspondiente valor en VA, tal como se indica en la tabla I.

Tabla I. **Burden normalizado para transformadores de corriente**

Burden Designation**	Resistance (Ohms)	Inductance (mH)	Impedance (Ohms)	Voltamperes (at 5 A)	Power Factor
Metering Burdens					
B-0.1	0.09	0.116	0.1	2.5	0.9
B-0.2	0.18	0.232	0.2	5.0	0.9
B-0.5	0.45	0.580	0.5	12.5	0.9
B-0.9	0.81	1.04	0.9	22.5	0.9
B-1.8	1.62	2.08	1.8	45.0	0.9

Fuente: Edison Electric Institute (EEI). Hanbook for Electricity Metering.

2.8.4. Factor de corriente térmico

Es conocido comúnmente como factor RF, es un factor que multiplicado a la corriente primaria indica la máxima corriente primaria que puede ser soportada continuamente por un transformador de corriente sin exceder los límites de temperatura a 30° ambiente promedio. Esto permite operar el transformador por encima de su valor nominal sin que se dañe.

En cuestión de costos, un factor térmico grande implica un costo y un tamaño mayor del instrumento.

3. ARMÓNICOS Y SERIES DE FOURIER

En este capítulo se describe el análisis de Fourier para descomponer una forma de onda periódica en componentes armónicos. Se presenta las características de las señales armónicas de corriente, las fuentes que lo provocan y los indicadores que se utiliza para su análisis.

3.1. Calidad de potencia

La calidad de potencia eléctrica se refiere a que las señales de tensión y corriente en un sistema eléctrico mantengan sus características en amplitud, frecuencia, forma de onda y simetría.

Las perturbaciones electromagnéticas provocan que estas características se vean modificadas y pueden afectar el funcionamiento de equipos eléctricos, dispositivos electrónicos y procesos industriales, causando daño y pérdidas económicas.

Las perturbaciones en los sistemas eléctricos se clasifican generalmente en las siguientes clases:

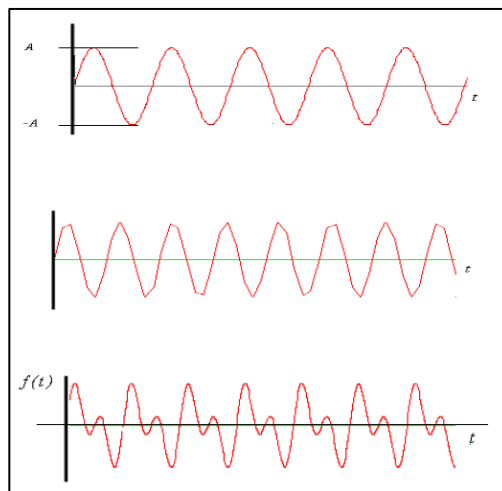
- De baja frecuencia (<9 kHz)
- De alta frecuencia (≥ 9 kHz)
- Descargas electrostáticas
- Caída de tensión y cortes
- Armónicos e interarmónicos
- Sobretensiones temporales

- Sobretensiones
- Sobretensiones transitorias
- Fluctuaciones de tensión
- Componentes de cc en redes de ca

En la figura 33 se muestra una onda con forma de onda senoidal pura y dos formas de onda distorsionadas.

En los sistemas eléctricos de potencia se conectan generadores, transportistas, distribuidores, usuarios residenciales y usuarios de comercio e industria entre otros. Cada uno de ellos tiene influencia e incide en la calidad de la potencia.

Figura 33. **Onda senoidal pura y onda distorsionada**



Fuente: GONZÁLEZ LÓPEZ, Francisco Javier. *Análisis de redes que contienen armónicas*. p. 8.

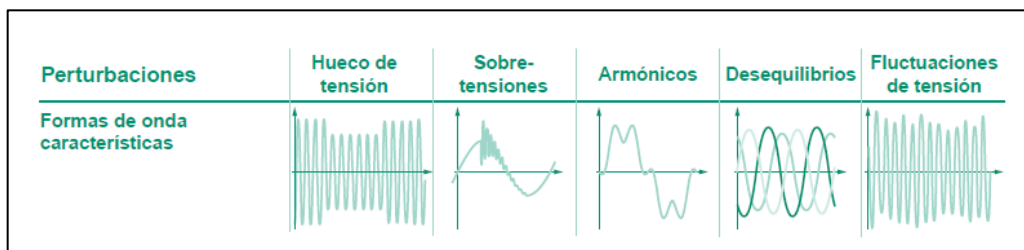
Es importante definir los parámetros de medida de la calidad de potencia y conocer la regulación que existe al respecto, de manera que se pueda realizar

mediciones para verificar su cumplimiento y tomar acciones preventivas y correctivas. En el capítulo 4 se menciona lo relativo a la normativa y regulación vigente en Guatemala.

En la figura 34 se muestra una gráfica con la distorsión en la forma de onda característica para diferentes tipos de perturbaciones.

Cada vez va aumentando el uso de cargas no lineales debido a la permanente optimización de las instalaciones eléctricas. Al mismo tiempo el uso de equipos más sensibles a las perturbaciones obliga a tener consideraciones que antes no se tenía respecto al diseño de las instalaciones y los equipos de medición.

Figura 34. **Formas de onda características para perturbaciones**



Fuente: FERRACCI, Philippe. *Cuaderno técnico No. 199 La calidad de la energía eléctrica*. p. 14.

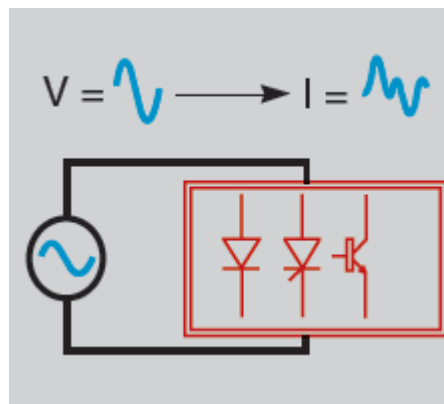
3.2. Origen de los armónicos

Se dice que una carga es no lineal cuando existe diferencia entre la forma de onda de la corriente y la forma de onda de la tensión que alimenta dicha carga. La circulación de las corrientes con forma distorsionada a través de las

impedancias del sistema crea, a su vez, distorsiones en tensión de alimentación.

En la figura 35 se muestra un circuito sencillo con carga no lineal y se muestra la distorsión de la señal de corriente I respecto de la señal de tensión V aplicada.

Figura 35. **Cargas no lineales**

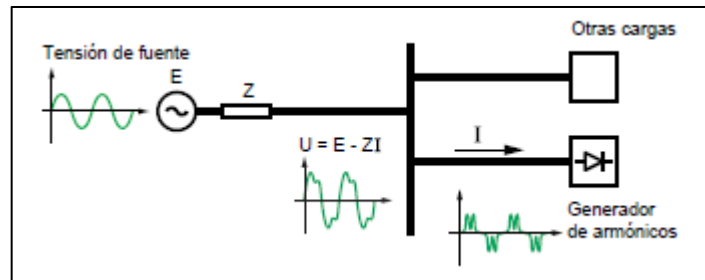


Fuente: Schneider Electric. *Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos*. p. 39.

En un sistema de distribución eléctrica las corrientes armónicas son causadas por cargas no lineales que están conectadas al mismo. La presencia de estos provoca que la corriente y la tensión se distorsionen y se desvíen de la forma ideal que es una onda senoidal pura.

En la figura 36 se muestra cómo se va degradando la señal de tensión en un circuito con diferentes ramales donde uno de ellos tiene cargas que generan armónicos.

Figura 36. **Degradación de la tensión de red producida por una carga no lineal**



Fuente: Schneider Electric. Cuaderno técnico No. 199 *La calidad de la energía eléctrica*. p. 18.

3.3. Función de onda periódica

Una onda periódica es aquella en que para todo tiempo t se cumple que:

$$f(t + T) = f(t)$$

Donde T es el período de la onda y determina el intervalo en que el valor de $f(t)$ es el mismo. Las señales de corriente y tensión se consideran funciones periódicas dado que sus valores se repiten en cada período.

3.4. Serie de Fourier

Es una herramienta matemática que ayuda a realizar cálculos para describir los fenómenos en los sistemas eléctricos.

Toda onda periódica puede ser representada matemáticamente por una serie de Fourier, y es una función periódica $f(t)$ compuesta por un valor

constante y por la suma de ondas sinusoidales ortogonales, como se indica a continuación:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{n=k} [A_n \cos(n\omega t) - B_n \sin(n\omega t)]$$

Donde:

A_0 = valor de corriente directa

A_n = valor de la amplitud de la n ésima función coseno

B_n = valor de la amplitud de la n ésima función seno

N = n ésimo término

ω = frecuencia en radianes, donde $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

El parámetro A_0 será el valor en corriente directa que determina el nivel constante en C.A. que es desplazado un parámetro alterno respecto al eje horizontal. Los parámetros de la sumatoria A_n y B_n definen las componentes de la fundamental A_1 y B_1 que son de la misma frecuencia de la onda analizada y las componentes de sus frecuencias más altas llamadas armónicas debido a que su frecuencia es un múltiplo de la frecuencia de las componentes fundamentales.

El término constante de la serie de Fourier está dado por:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$$

Lo cual es el área bajo la curva de $f(t)$ desde $-T/2$ hasta $+T/2$, dividido por el período de la forma de onda T ; es decir, el valor promedio de la función. Mientras que A_n y B_n son dados respectivamente por:

$$A_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad \text{para } n = 1 \rightarrow \infty$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \operatorname{Sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad \text{para } n = 1 \rightarrow \infty$$

Cuando la forma de onda tiene simetría, las ecuaciones anteriores se simplifican. Una onda con simetría impar significa que cuando $f(t) = -f(-t)$, entonces A_n es cero para todos los valores de n y B_n esta dado por:

$$B_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \operatorname{Sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt$$

La serie de Fourier para una función impar tendrá solo términos seno.

Una onda con simetría par significa que cuando $f(t) = f(-t)$, entonces B_n es cero para todos los valores de n y A_n esta dado por:

$$A_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt$$

La serie de Fourier para una función par tendrá solo términos coseno.

3.5. La transformada de Fourier

La transformada de Fourier permite expresar funciones del dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia. La inversa de la transformada de Fourier permite pasar funciones del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo. La serie de Fourier representa el caso especial de la transformada de Fourier aplicada a una señal periódica.

El análisis de Fourier aplicado a una señal periódica continua en el dominio del tiempo, produce una serie de componentes de frecuencia discretos en el dominio de la frecuencia. Las ecuaciones siguientes representan el par de la transformada de Fourier:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j2\pi ft} \cdot dt$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(f)e^{j2\pi ft} \cdot df$$

Generalmente $F(f)$ es compleja y se puede escribir como

$$F(f) = \text{Re}F(f) + j\text{Im}F(f)$$

La parte real de $F(f)$ se obtiene de

$$\text{Re}F(f) = \frac{1}{2} [F(f) + F(-f)]$$

$$\text{Re}F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\text{Cos}(2\pi ft) dt$$

De la misma forma, la parte imaginaria de $F(f)$ se obtiene de

$$\text{Im}F(f) = \frac{1}{2} [F(f) - F(-f)]$$

$$\text{Im}F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\text{Sen}(2\pi ft) dt$$

El espectro de amplitud de la señal de frecuencia se obtiene de

$$[f(t)] = \sqrt{(ReF(f))^2 + (ImF(f))^2}$$

Y el espectro de fase es

$$\phi(f) = \tan^{-1} \left[\frac{ImF(f)}{ReF(f)} \right]$$

Los sistemas de potencia con corrientes y tensiones armónicas se pueden describir en términos de las series de Fourier:

Tensión $v(t) = \sum_{n=1}^n V_n \text{Sen}(n\omega_0 t + \theta_n)$

Corriente $i(t) = \sum_{n=1}^n I_n \text{Sen}(n\omega_0 t + \phi_n)$

Potencia activa $P = \sum_{n=1}^n V_n I_n \text{Cos}(\theta_n - \phi_n)$

Potencia reactiva $Q = \sum_{n=1}^n V_n I_n \text{Sen}(\theta_n - \phi_n)$

Tensión RMS $V_{RMS} = \sqrt{\sum_{n=1}^n V_n^2}$

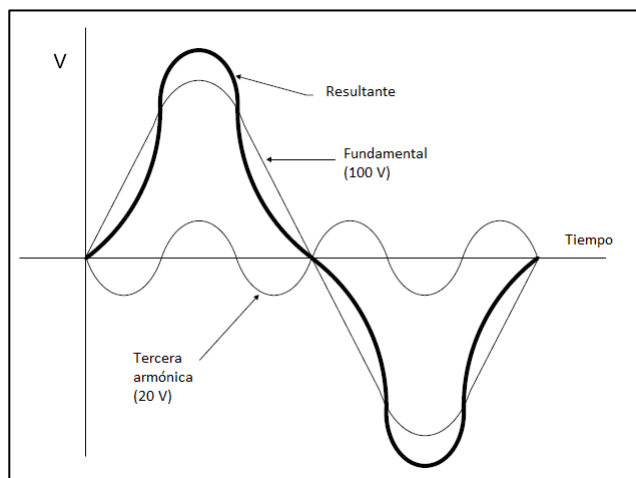
Corriente RMS $I_{RMS} = \sqrt{\sum_{n=1}^n I_n^2}$

3.6. Amplitud y orden

Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan, los cuales son:

- Amplitud, esta hace referencia al valor de la tensión o corriente del armónico. La amplitud del armónico se expresa generalmente en términos de un porcentaje del valor fundamental.
- Orden, hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz).

Figura 37. **Onda senoidal con tercera armónica al 20 %**



Fuente: Edison Electric Institute (EEI). Handbook for Electricity Metering. p. 85.

Así un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir $3 \times 60 = 180 \text{ Hz}$. En la figura 37 se muestra una onda

distorsionada resultante de una señal fundamental y una onda con componente de tercer armónico con el 20 % del valor de la fundamenta.

3.7. Valor eficaz

El valor eficaz o valor medio cuadrático (RMS) de una onda distorsionada se obtiene calculando la suma cuadrática de los diferentes valores de la onda para todos los órdenes armónicos existentes para dicha onda:

$$\text{Valor eficaz de corriente} = \sqrt{(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)}$$

De lo anterior se deduce que el valor eficaz de todas las componentes armónicas es el siguiente:

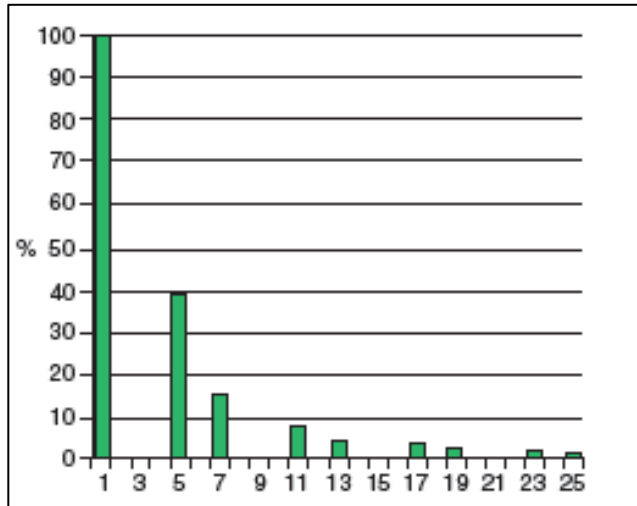
$$i_h = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)}$$

Este cálculo pone en evidencia uno de los principales efectos de los armónicos que es el aumento de la corriente eficaz que atraviesa un sistema eléctrico debido a las componentes armónicas que lleva asociada una onda distorsionada.

3.8. Espectro armónico de amplitud

Es una representación gráfica de la amplitud de cada componente armónico en función de la frecuencia. Puede ser discreto para formas de onda periódica o continua para formas de onda no periódicas. En la figura 38 se muestra un ejemplo de una gráfica de espectro de amplitud discreto.

Figura 38. **Gráfico de espectro de amplitud armónica**



Fuente: Schneider Electric. *Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos*. p. 82.

3.9. Espectro armónico de fase

Es una representación gráfica del ángulo de fase de cada componente armónico en función de la frecuencia. Puede ser discreto para formas de onda periódica o continua para formas de onda no periódicas.

3.10. Clasificación de armónicas

Las armónicas están divididas en pares, impares, triples, sub-armónica, inter-armónica.

3.10.1. Armónicas pares

Son las armónicas que tienen frecuencias múltiplos enteros de dos ($h=2, 4, 6, 8, 10$, entre otros).

3.10.2. Armónicas impares

Son las armónicas que tienen frecuencias que no son múltiplos enteros de dos ($h= 1, 3, 5, 7, 9$, entre otros).

3.10.3. Armónicas triples

Son las armónicas que tienen frecuencias múltiplos enteros de tres ($h= 3, 6, 9, 12, 15$, entre otros).

3.10.4. Sub-armónica

Es una componente armónica de frecuencia menor que la componente fundamental.

3.10.5. Inter armónica

Es una componente armónica de frecuencia superior a la frecuencia de la componente fundamental cuyo orden armónico no es un múltiplo entero del orden armónico de la componente fundamental.

3.11. Factores de distorsión armónica

El factor de distorsión armónica es una medida de la presencia de armónicos en una red, representa en porcentaje la importancia de cada armónico respecto al valor de la fundamental.

$$T_h(\%) = \frac{A_h}{A_1}$$

Donde:

A_h = valor del armónico de orden h

A_1 = valor a la frecuencia fundamental

3.11.1. Factor de distorsión armónico total (THD)

El factor de distorsión armónico total es una medida de la cantidad de distorsión armónica contenida en una onda distorsionada; representa en porcentaje la importancia del total de la distorsión respecto al valor de la fundamental o respecto al valor total de la onda.

Este factor sirve para conocer la situación real de las instalaciones respecto al grado de contaminación armónica.

3.11.2. Factor de distorsión armónico total de tensión

El factor de distorsión armónico total de tensión se define por:

$$THD\%(v) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n V_h^2}}{V_1} \cdot 100$$

Donde:

V_1 = valor eficaz de la componente fundamental de tensión

V_h = valor eficaz de la componente armónica de orden h

El factor de distorsión armónico total de tensión determina la deformación de la onda de tensión, e indica la relación existente entre la suma de las tensiones de los armónicos y la tensión de la fundamental, expresándose en %.

Se da una idea de cuanta potencia más será consumida cuando una tensión que tiene forma de onda distorsionada es aplicada a una resistencia.

3.11.3. Factor de distorsión armónico total de corriente

El factor de distorsión armónico total de corriente se define por:

$$THD\%(i) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n I_h^2}}{I_1} \cdot 100$$

Donde:

I_1 = valor eficaz de la componente fundamental de tensión

I_h = valor eficaz de la componente armónica de orden h

El factor de distorsión armónico total de corriente determina la deformación de la onda de corriente, e indica la relación existente entre la suma de las corrientes de los armónicos y la corriente de la fundamental, expresándose en % representa el valor potencial de calentamiento de las armónicas relativo a la componente fundamental.

3.12. Principales fuentes de armónicos

Las cargas armónicas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia tales

como variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, etc. Otro tipo de cargas tales como reactancias saturables, equipos de soldadura, hornos de arco, etc., también inyectan armónicos.

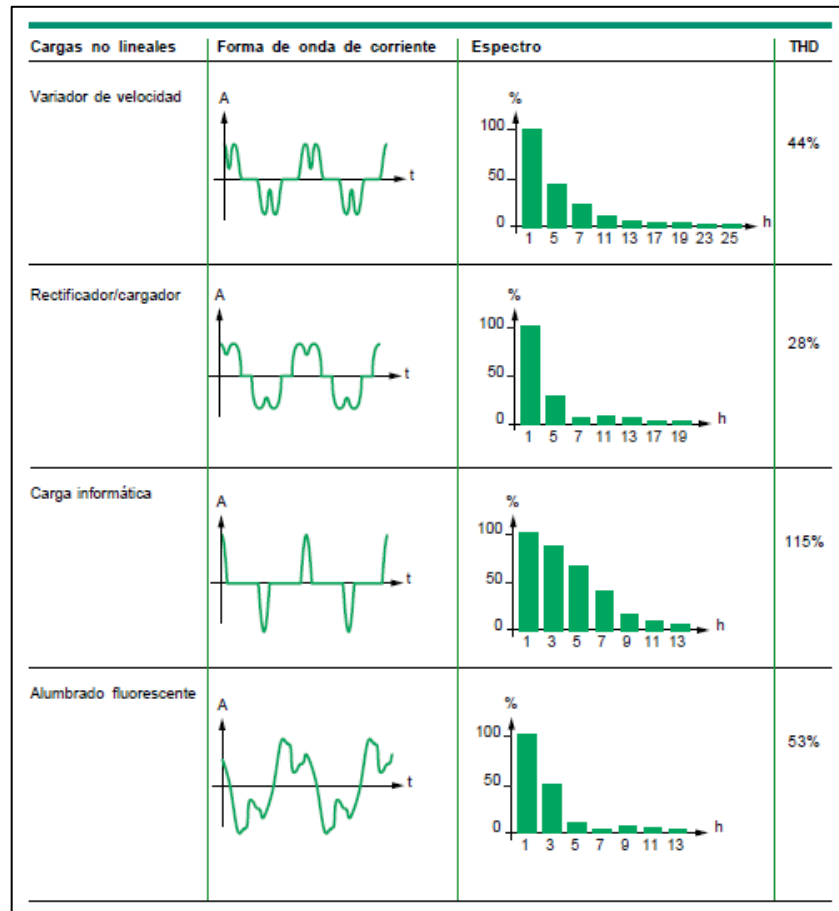
En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales que, a pesar de ser alimentadas con una tensión senoidal, producen una corriente no senoidal. Para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de corriente que inyectan armónicos en la red.

Según su aplicación, las siguientes son cargas que genera armónicos:

- Industriales: variadores de potencia, rectificadores, onduladores, equipos de electrónica de potencia.
- Equipos que utilizan arco eléctrico: hornos de arco, máquinas de soldar, arranques de motores electrónicos, enganches de transformadores de potencia.
- Domésticas: Televisores, hornos de microondas, placas de inducción, computadoras, placas de inducción, lámparas fluorescentes.

En la figura 39 se muestra la forma de onda típica y el espectro de amplitud armónico para cargas no lineales de un variador de velocidad, un rectificador/cargador, equipo informático y alumbrado fluorescente.

Figura 39. Características de algunos generadores de armónicos



Fuente: Schneider Electric. Cuaderno técnico No. 199 *La calidad de la energía eléctrica*. p. 110.

En las instalaciones eléctricas con el neutro distribuido, las cargas no lineales pueden provocar en el conductor sobrecargas importantes debidas a la presencia del armónico de tercer orden que de no tomarse en cuenta en el cálculo del diseño de la instalación puede dañar o quemar el conductor.

Una carga no lineal absorberá una corriente que contiene todos los armónicos, pares e impares. La mayor parte de las cargas conectadas a la red

son simétricas, es decir, que las dos semiondas de corriente son iguales y opuestas. En este caso, los armónicos de orden par son nulos.

Si en una instalación se encuentran con cargas trifásicas, no lineales, equilibradas, simétricas y sin conexión de neutro, y estas cargas no lineales absorben componente armónica de tercer orden, las corrientes armónicas del 3er armónico serán iguales; pero como no hay conexión a neutro la suma de las corrientes del 3er armónico será 0. Por tanto, si no están conectadas a un cable de neutro, las cargas trifásicas equilibradas simétricas no producen armónico de 3er orden.

Este planteamiento se puede aplicar a todos los armónicos múltiplos de 3. El armónico de tercer orden generalmente predomina en las cargas monofásicas.

En las cargas con rectificador monofásico a diodos con filtro capacitivo, el armónico de tercer orden puede alcanzar el 80% de la fundamental.

3.13. Consecuencia de los armónicos

Las principales consecuencias de la presencia de armónicos son:

- Aumento de la corriente eficaz en los diferentes circuitos
- Deterioro de la calidad de la tensión de alimentación

El impacto negativo provocado por los armónicos puede pasar inadvertido, pero al mismo tiempo puede ocasionar unos resultados económicos desfavorables.

Por este motivo, una reducción adecuada de los armónicos contribuirá a mejorar la competitividad de las empresas y de los usuarios del servicio de formas diferentes:

- Con la reducción de sobrecarga del sistema eléctrico, lo que libera capacidad disponible.
- Con la reducción de las pérdidas del sistema y de la potencia de demanda.
- Con la reducción de los riesgos de cortes de alimentación.
- Con el aumento de la vida útil de los equipos.

En la tabla II se resume el efecto producido por armónicos en dispositivos eléctricos como condensadores de potencia, motores, interruptores automáticos, cables, ordenadores y dispositivos de electrónica de potencia.

Tabla II. **Efectos de los armónicos en dispositivos eléctricos**

Materiales	Efectos
Condensadores de potencia	Calentamiento, envejecimiento prematuro (perforación), resonancia.
Motores	Pérdidas y calentamientos suplementarios, reducción de las posibilidades de utilización a plena carga, par pulsante (vibraciones, fatiga mecánica), molestias sonoras.
Transformadores	Pérdidas en el hierro y en el cobre, calentamientos suplementarios, vibraciones mecánicas, molestias sonoras.
Interruptores automáticos	Disparos intempestivos, sobrepasar los valores de la tensión de cresta.
Cables	Pérdidas dieléctricas y óhmicas suplementarias, particularmente en el neutro en el caso de presencia de tercer armónico.
Ordenadores	Trastornos funcionales
Electrónica de potencia	Trastornos debidos a la forma de onda, conmutación, sincronización

Fuente: Schneider Electric. Cuaderno técnico No. 199 *La calidad de la energía eléctrica*. p. 15.

3.14. Medición de armónicas

Para mantener un eficiente y efectivo suministro de servicio eléctrico es necesario definir los niveles de distorsión que se puede permitir en las redes eléctricas de distribución.

Esta necesidad ha traído como consecuencia el desarrollo de instrumentos y técnicas, que se mejoran día con día, para medición de los niveles armónicos. Los instrumentos para la medición que hoy día están disponibles en el mercado son diversos y generalmente están incluidos en los analizadores de red, analizadores de calidad de potencia y medidores de energía para fines comerciales.

Los propósitos de la medición pueden ser:

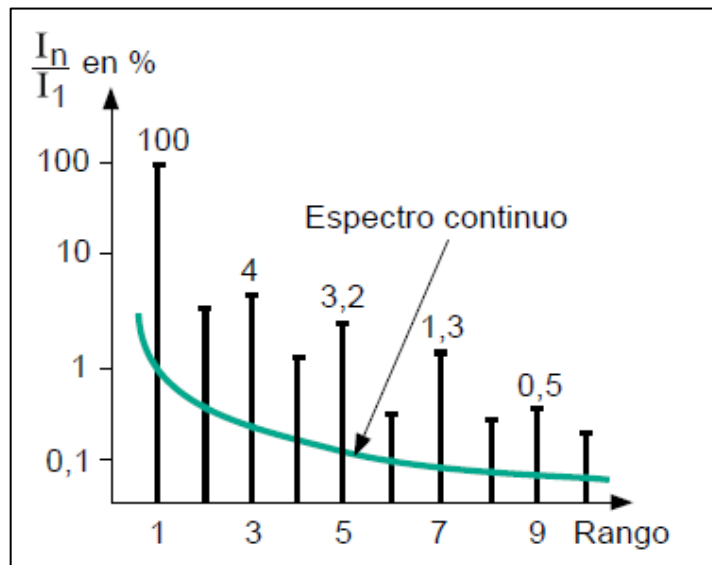
- Revisar los niveles armónicos presentes en la red eléctrica para comparar con un estándar.
- Comprobar las causas de un problema que se sospecha es debido a armónicas.
- Obtener información de respaldo en sistemas que tienen armónicas.

La habilidad para descomponer alguna forma de onda periódica considerando su grado de distorsión, es significativa desde el punto de vista de análisis de sistemas.

Usando esta técnica se puede considerar separadamente cada componente senoidal de la onda distorsionada, usando métodos de solución de circuitos y después aplicar superposición. La descomposición de alguna onda periódica en su fundamental y componentes armónicos se realiza por el análisis

de Fourier. En la figura 40 se presenta la gráfica de espectro de corriente en un horno eléctrico.

Figura 40. **Espectro de corriente que alimenta un horno en corriente alterna**



Fuente: Schneider Electric. Cuaderno técnico No. 152 Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento. p. 86.

3.15. Efecto de los armónicos en instrumentos de medición

El efecto de los armónicos dependerá del aumento, en tensión o corriente de sus valores de cresta que provoca deterioro de la rigidez dieléctrica. El aumento de los valores eficaces incide en el calentamiento de los conductores y demás elementos mecánicos.

En el espectro de frecuencia armónica provoca el aumento de vibración y fatiga mecánica. La consecuencia en los equipos de medida es la pérdida de la exactitud de los instrumentos.

Un medidor de energía de inducción, de clase de exactitud 2 %, da un error adicional del 0,3 % con una tasa del 5 % del armónico de orden 5 en corriente y tensión.

4. NORMATIVA DE MEDICIÓN COMERCIAL Y CALIDAD DE POTENCIA

En este capítulo se presenta las diferentes normativas y regulaciones sobre la medición de energía eléctrica en Guatemala, las normas internacionales en las cuales se sustenta las normas nacionales, donde se especifican los requisitos técnicos para las pruebas de exactitud de medidores.

4.1. Organismos reguladores

Los organismos reguladores que rigen en Guatemala esta definidos la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR), la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), Administrador del Mercado Mayorista (AMM).

4.1.1. Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR)

Es una entidad adscrita al Ministerio de Economía, cuya principal misión es la de proporcionar soporte técnico al sector productivo del país y protección al consumidor, por medio de la actividad de normalización en general para toda actividad económica. Es la responsable de emitir las normas para uso y aplicación nacional.

4.1.2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE)

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), es el ente gubernamental responsable de velar por el cumplimiento de la Ley General de

Electricidad y su Reglamento, regulando a favor de la eficiencia, estabilidad y sostenibilidad del sector eléctrico en Guatemala.

La Ley General de Electricidad y su Reglamento hacen referencia a normas internacionales como ANSI e IEC en lo referente a medidores de energía eléctrica, dado que al momento de publicarse dicha ley no existía norma nacional para medidores.

4.1.3. Administrador del Mercado Mayorista (AMM)

El Administrador del Mercado Mayorista AMM es una entidad privada sin fines de lucro cuyas funciones son la coordinación de la operación de centrales generadoras, interconexiones internacionales y líneas de transporte al mínimo costo para el conjunto de operaciones del mercado mayorista, en un marco de libre contratación de energía entre agentes del mercado.

Garantiza la seguridad y el abastecimiento de energía eléctrica en el país. Establece precios de mercado de corto plazo para las transferencias de potencia y energía cuando no corresponde a contratos libremente pactados.

El reglamento del Administrador del Mercado Mayorista fue emitido por un acuerdo Gubernativo, y el propio AMM ha emitido sus normas de Coordinación Comercial y normas de Coordinación Operativa, siendo la NCC-14 Habilitación comercial para operar en el mercado mayorista y sistema de medición comercial, la que define los requisitos para la medición.

4.2. Normas aplicables a medidores de energía eléctrica

A continuación, se describen las normas que se aplican a los medidores.

4.2.1. Norma NTG OIML R 46/1 y R 46/2:2012

En el año 2,017 COGUANOR convoca un Comité Técnico de Normalización de Metrología – Medidores de Energía Eléctrica, conformado por representantes de diversos organismos del sector eléctrico para trabajar en la norma nacional para medidores de energía eléctrica y el 17 de julio de 2,018 el Consejo Nacional de Normalización adopta la norma NTG OIML R 46/1 y R 46/2:2012.

En Guatemala se utilizan medidores construidos bajo diversas normas. Esta norma aplica a medidores construidos bajo normativas emitidas por la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC, por sus siglas en inglés); para medidores construidos bajo normativas ANSI se aplicarán los criterios ANSI correspondientes. COGUANOR adoptará las Normas ANSI respectivas para estos medidores.

La organización Internacional de Metrología Legal (OIML) es una organización intergubernamental a nivel mundial cuyo principal propósito es armonizar las regulaciones y controles metrológicos aplicados por los servicios metrológicos nacionales, u organizaciones relacionadas de los Estados Miembro.

Esta norma nacional es la adopción de la OIML R46-1/-2 Medidores de energía eléctrica activa, en su parte 1 se refiere a los requisitos técnicos y metrológicos; en su parte 2 se refiere a controles metrológicos y pruebas de desempeño.

La norma NTG OIML R 46/1 y R 46/2:2012 define dentro de los requisitos metrológicos lo siguiente:

- Unidades de medida
- Condiciones nominales de operación
- Requisitos de exactitud
- Requisitos para medidores por bandas horarias y multi tarifa
- Marcas o datos de placa del medidor

Respecto a los controles metrológicos y pruebas de desempeño define lo siguiente:

- Aprobación de modelo
- Programa de ensayos
- Procedimiento de ensayo para aprobación de modelo
- Evaluación y aprobación de modelo
- Verificación

4.2.1.1. Requisitos de exactitud

Se definen las clases de exactitud con las letras A, B, C y D, el fabricante deberá especificar la clase de exactitud del medidor. Siendo la D la de mayor exactitud y la A la de menor exactitud.

El medidor debe estar diseñado y fabricado de forma que su error no supere el error máximo permitido para la clase especificada en condiciones nominales de funcionamiento.

4.2.1.2. Condiciones nominales de funcionamiento

La norma define las condiciones nominales de funcionamiento bajo las cuales debe operar el medidor, en esta se especifica condiciones o magnitudes

de influencia como tensión, frecuencia, corriente, factor de potencia, temperatura, humedad, formas de conexión, armónicos y balance de carga.

La clase de exactitud se define con base a las corrientes de operación que deben ser especificadas por el fabricante y están definidas de la siguiente manera:

- I_{st} , corriente de arranque, es el valor más bajo de corriente especificado por el fabricante donde el medidor debe registrar energía eléctrica con factor de potencia unitario y para el caso de medidores polifásicos con carga balanceada.
- I_{min} , corriente mínima, es el valor mínimo de corriente especificado por el fabricante donde el medidor cumple con los requisitos de exactitud.
- I_{tr} , corriente de transición, es el valor de la corriente en y por encima del cual el medidor, según lo especificado por el fabricante, se encuentra dentro del menor error máximo permitido correspondiente a la clase de exactitud del medidor.
- I_{max} , corriente máxima, es el valor más alto de corriente en donde el medidor, según lo especificado por el fabricante, cumple los requisitos de exactitud.

De esta manera, las condiciones nominales de operación de corriente están definidas según la clase de exactitud que se indica en la tabla III para medición directa y en la tabla IV para medición indirecta.

Tabla III. **Condiciones nominales de corriente medición directa**

Medición directa	Clase de exactitud			
	A	B	C	D
I_{max}/I_{tr}	≥50	≥50	≥50	≥50
I_{max}/I_{min}	≥100	≥125	≥250	≥250
I_{max}/I_{st}	≥1000	≥1 250	≥1 250	≥1 250

Fuente: Norma técnica guatemalteca NTG OIML R 46/1 y R 46/2:2012. p. 13.

Tabla IV. **Condiciones nominales de corriente medición indirecta**

Medición indirecta	Clase de exactitud			
	A	B	C	D
I_{max}/I_{tr}	≥24	≥24	≥24	≥24
I_{max}/I_{min}	≥60	≥120	≥120	≥120
I_{max}/I_{st}	≥480	≥600	≥1 200	≥1 200

Fuente: Norma técnica guatemalteca NTG OIML R 46/1 y R 46/2:2012. p.13.

4.2.1.3. **Error máximo permitido de carga**

El error intrínseco se expresa en porcentaje y debe estar dentro del error base máximo permitido indicado en la tabla V cuando se varíe la corriente y el factor de potencia dentro de los límites indicados en dicha tabla.

Tabla V. Errores base máximos permitidos

Cantidad		Error base máximo permitido (%) por clase de medidor			
Corriente I	Factor de potencia	A	B	C	D
$I_{tr} \leq I \leq I_{max}$	Unidad	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$
	0,5 inductivo a 1 a 0,8 capacitivo	$\pm 2,5$	$\pm 1,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,3$
$I_{tr} \leq I \leq I_{max}$	Unidad	$\pm 2,5$	$\pm 1,5$	$\pm 1,0$	$\pm 0,4$
	0,5 inductivo a 1 a 0,8 capacitivo	$\pm 2,5$	$\pm 1,8$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$
$I_{tr} \leq I \leq I_{max}$	Unidad	$\pm 2,5 * I_{min}$ //	$\pm 1,5 * I_{min}$ //	$\pm 1,0 * I_{min}$ //	$\pm 0,4 * I_{min}$ //

Fuente: Norma técnica guatemalteca NTG OIML R 46/1 y R 46/2:2012. p.16.

La norma aclara que las autoridades nacionales podrán especificar los errores base máximos permitidos para las verificaciones posteriores y las inspecciones en servicios.

4.2.1.4. Efectos por magnitudes de influencia

Cuando la corriente de carga y el factor de potencia se mantienen constantes en un punto dentro del rango de funcionamiento nominal con el medidor funcionando en condiciones de referencia y cuando se varía una cantidad única de influencia desde su valor en condiciones de referencia hasta sus valores extremos, la variación del error debe ser tal que el error porcentual adicional esté dentro del límite de cambio de error indicado en la tabla VI:

Tabla VI. **Cambio en los límites de error debido a armónicos**

Magnitud de influencia	Valor	Valor de la corriente	Factor de potencia	Cambio en los límites de error (%) por clase de medidor			
				A	B	C	D
Armónicos en los circuitos de corriente y tensión	D es 0 - 40% I, 0-5% U	$I_{tr} \leq I \leq I_{max}$	1	±1,0	±0,6	±0,3	±0,2

Fuente: Norma técnica guatemalteca NTG OIML R 46/1 y R 46/2:2012. p.17.

4.2.2. Norma ANSI C12.1 para medidores de electricidad

La norma ANSI C12.1:2008 establece los criterios de desempeño aceptables para tipos nuevos de vatihorímetros en corriente alterna, medidores de demanda, registradores de demanda y dispositivos auxiliares.

Describe los niveles de desempeño aceptables para medidores en servicio y dispositivos utilizados para mediciones con fines de facturación. También contiene recomendaciones sobre patrones de medición, requisitos de instalación, métodos de prueba y programas de prueba.

Esta norma está realizada como referencia para lo que corresponde respecto a la medición de energía eléctrica, como empresas de servicios públicos, fabricantes y organismos de regulación.

4.2.2.1. Patrones y trazabilidad

Es responsabilidad de las empresas de servicios establecer y mantener trazabilidad de su patrón de energía al patrón nacional ya sea en forma directa

o indirecta. Esta trazabilidad debe documentar debidamente la relación entre los medidores con fines de facturación y el patrón nacional.

Existen varios métodos para establecer la trazabilidad, por medio de comparación directa con un patrón viajero, con laboratorios independientes que posean trazabilidad o con un patrón de referencia propiedad de la empresa de servicios, y sirve para comparar el resto de patrones.

4.2.2.2. Condiciones de laboratorio

El laboratorio de medidores debe preocuparse por mantener patrones con trazabilidad demostrada y asignar valores de calibración o corrección a patrones de trabajo.

En un laboratorio es esencial que las condiciones ambientales como temperatura y humedad se mantengan en valores apropiados a las mediciones que se realicen. Otras condiciones ambientales que puedan interferir con mediciones apropiadas como contaminación atmosférica, vibraciones mecánicas, interferencia electromagnética y ruido deben también manejarse a niveles de tal forma que las técnicas de medición y los resultados no se vean afectados.

Las fuentes de corriente alternan utilizadas para calibración de instrumentos y medidores deben estar suficientemente reguladas dado que las fluctuaciones pueden afectar la exactitud de la calibración o la medición. Adicional deben estar libre de distorsión en la forma de onda y la relación de fases.

4.2.2.3. Referencia de temperatura y humedad

La temperatura de ambiente en laboratorio debe ser de 23 °C, con tolerancias que dependerán de los efectos de la temperatura en los patrones utilizados en las pruebas. Esta temperatura debe mantenerse constante no solo durante el procedimiento de la prueba sino también en el período previo lo suficiente para asegurar un equilibrio en la temperatura tanto en el equipo patrón como en el instrumento bajo prueba. La humedad relativa no debe exceder el 80 % sin condensación.

4.2.2.4. Requerimientos de desempeño para patrones de energía

El patrón debe estar en buenas condiciones de operación y debe estabilizarse de acuerdo a las especificaciones del fabricante o puede establecerse con un histórico de registros. En la tabla VII se indica las condiciones de referencia.

La tensión de prueba debe mantenerse constante dentro de ± 1 %. La corriente de prueba debe mantenerse constante dentro de ± 1 %. El ángulo de fase de prueba debe mantenerse constante dentro de $\pm 2^\circ$. La frecuencia de prueba debe mantenerse constante dentro de $\pm 0,2$ %. La distorsión armónica total (THD), de las corrientes y tensiones aplicadas no debe exceder 2,0 %.

Campos magnéticos fuertes pueden afectar el desempeño de los patrones, se debe tener cuidado de evitar colocar los patrones cerca de transformadores energizados y circuitos de corriente principales.

El asilamiento entre los conductores de corriente de los diferentes circuitos y otras partes metálicas debe ser capaz de soportar la aplicación de voltaje senoidal de 2,3 kV rms, 60 Hz por 1 minuto sin que la corriente de fuga exceda 0,005 A por circuito.

Tabla VII. **Condiciones de referencia**

Condición	Referencia
Tensión	120V
Corriente	50,0 A
Frecuencia	60 Hz
Factor de potencia	Unitario y 0,5 atraso
Temperatura	23°C

Fuente: Norma ANSI C12.1-2008. *Código para la medición de electricidad*. p. 13.

A esos puntos de referencia, el error luego de la aplicación de los valores de calibración de los patrones de referencia y portátil no debe exceder los siguientes valores indicados en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Porcentaje de error de patrones de referencia y portátiles**

Patrón	Porcentaje de error	
	FP 1	FP 0.5
Patrón portátil	0,1 %	0,2 %
Patrón de referencia	0,05 %	0,1 %

Fuente: Norma ANSI C12.1-2008. *Código para la medición de electricidad*. p. 14.

4.2.2.5. Requerimientos de desempeño y condiciones de prueba

Se define un listado de pruebas que debe realizarse y un listado para cada una de ellas. Todas las pruebas deben realizarse con el dispositivo de medición bajo prueba montado de una manera convencional como una caja socket o una caja con borneras, libre de vibraciones. Todas las pruebas de corriente alterna deben realizarse en un circuito suministrado por una fuente de onda senoidal con una distorsión no mayor al 3 %. Cuando el dispositivo tenga más de un circuito de tensión y corriente, debe realizarse la prueba con los circuitos de tensión en paralelo y los circuitos de corriente en serie apropiadamente, a menos que se especifique lo contrario.

En la tabla IX se lista las pruebas requeridas, indicadas en la norma ANSI C12.1:2018:

Tabla IX. Listado de pruebas norma ANSI C12.1:2018

Descripción de pruebas de certificación	ANSI C12.1
Sin carga o vacío	Prueba #1
Corriente de arranque	Prueba #2
Desempeño de carga	Prueba #3
Efecto de la variación de factor de potencia	Prueba #4
Efecto de la variación de la tensión	Prueba #5 o 5 ^a
Efecto de la variación de la frecuencia	Prueba #6
Equilibrio de circuitos de corriente	Prueba #7
Pérdidas internas del medidor	Prueba #8
Aumento de temperatura	Prueba #9
Efecto de fricción en el registro	Prueba #10
Efecto de calentamiento interno	Prueba #11
Efecto de inclinación	Prueba #12
Estabilidad del desempeño	Prueba #13
Independencia de elementos	Prueba #14
Aislamiento	Prueba #15
Interrupciones de tensión	Prueba #16
Efecto de picos de alto voltaje	Prueba #17

Continuación de la tabla IX.

Efecto de campo magnético externo	Prueba #18
Efecto de variación de temperatura	Prueba #19 o 19A
Efecto de sobrecarga temporal	Prueba #20
Efecto de picos de corriente en conductores de puesta a tierra	Prueba #21
Efecto de señales superpuestas	Prueba #22
Efecto de la variación de tensión en la base de tiempo secundaria	Prueba #23
Efecto de variación de temperatura ambiente en la base de tiempo secundaria	Prueba #24
Efecto de ráfaga de transitorios	Prueba #25
Efecto de oscilación eléctrica	Prueba #25
Efecto de interferencia de radio frecuencia	Prueba #26
Emisión de radio frecuencia conducida y radiada	Prueba #27
Efecto de descarga electrostática	Prueba #28
Efecto de temperatura de almacenaje	Prueba #29
Efecto de temperatura operativa	Prueba #30
Efecto de humedad relativa	Prueba #31
Golpe mecánico	Prueba #32
Caída en el transporte	Prueba #33
Vibración mecánica	Prueba #34
Vibración en el transporte	Prueba #35
Simulación de clima	Prueba #36
Salinidad	Prueba #37
Tenacidad	Prueba #38

Fuente: Norma ANSI C12.1:2018. *Código para la medición de electricidad*. p. 20.

4.2.2.6. Prueba de corriente de arranque

El dispositivo de medición debe operar continuamente con una corriente especificada. Para dispositivos de rango amplio de tensión, debe usarse el valor más bajo de tensión. En la tabla X se indica los valores de corriente de arranque para cada clase de corriente.

Tabla X. Prueba de corriente de arranque

Clase de corriente	Corriente en amperios
10	0,025
20	0,025
100	0,15
200	0,30
320	0,50

Fuente: Norma ANSI C12.1:2018. Código para la medición de electricidad. p. 21.

4.2.2.7. Prueba de desempeño de carga

El desempeño del dispositivo de medición no debe desviarse del registro de referencia excediendo la desviación máxima indicada en la tabla XI, excepto por las pruebas de las condiciones (9) a (11), debe omitirse para dispositivos de dos elementos y cuatro alambres.

Tabla XI. Prueba de desempeño de carga

	Clase de corriente					Máxima desviación en porcentaje del desempeño de referencia
	10	20	100	200	320	
Condición	Corriente en amperios					
(1)	0,15	0,15	1	2	3	±2,0
(2)	0,25	0,25	1,5	3	5	±1,0
(3)	0,5	0,5	3	6	10	±1,0
(4)	1,5	1,5	10	20	30	±1,0
(5)	2,5	2,5	15	30	50	Referencia
(6)	-	5	30	60	75	±1,0
(7)	5	10	50	100	100	±1,5
(8)	7,5	15	75	150	150	±2,0
(9)	-	18	90	180	250	±2,0
(10)	10	-	100	200	300	±2,0
(11)	-	20	-	-	320	±2,5

Fuente: Norma ANSI C12.1:2018. Código para la medición de electricidad. p. 21.

4.2.2.8. Prueba de efecto de variación del factor de potencia

Cada elemento de un dispositivo de medición con múltiples elementos debe probarse como un dispositivo de un solo elemento, excepto que los circuitos de tensión estén en paralelo.

Para medidores de un solo elemento, el efecto de la variación del factor de potencia en el desempeño del dispositivo de medición no debe exceder la desviación máxima especificada en la tabla XII:

Tabla XII. Efecto de la variación de factor de potencia, un solo elemento

Condición	Clase de corriente				Factor de potencia	Desviación máxima en porcentaje del desempeño de referencia
	10	100	200	320		
	Corriente en amperios					
Referencia de desempeño Condición (1) Condición (1)	0,25 0,5	1,5 3	3 6	5 10	1,0 0,5 atraso	Referencia $\pm 2,0$
Referencia de desempeño Condición (2) Condición (2)	5 5	50 50	100 100	150 150	1,0 0,5 atraso	Referencia $\pm 2,0$
Referencia de desempeño Condición (3) Condición (3)	10 10	100 100	200 200	320 320	1,0 0,5 atraso	Referencia $\pm 2,0$

Fuente: Norma ANSI C12.1:2018. *Código para la medición de electricidad*. p. 22.

Para medidores de dos elementos tipo red, dos elementos tres fases tres hilos, dos elementos tres fases cuatro hilos delta y dos elementos dos fases 5 hilos, el efecto de la variación del factor de potencia en el desempeño del dispositivo de medición no debe exceder la máxima desviación indicada en la tabla XIII:

Tabla XIII. **Efecto de la variación de factor de potencia en medidores de dos elementos**

Condición	Clase de corriente					Factor de potencia	Desviación máxima en porcentaje del desempeño de referencia
	10	20	100	200	320		
	Corriente en amperios						
Referencia de desempeño Condición (1) y (2)	0,5	0,5	3	6	10	1,0	Referencia ±2,0
Condición (1)	0,5	0,5	3	6	10	0,866 adelanto	
Condición (2)	1,0	1,0	6	12	20	0,5 atraso	
Referencia de desempeño Condición (3)	2,5	2,5	15	30	50	1,0	Referencia ±1,0
Condición (3)	2,5	2,5	15	30	50	0,866 adelanto	
Referencia de desempeño Condición (4) y (5)	5	10	50	100	150	1,0	Referencia ±1,0
Condición (4)	5	10	50	100	150	0,866 adelanto	
Condición (5)	5	10	50	100	150	0,5 atraso	
Referencia de desempeño Condición (6) y (7)	10	20	100	200	320	1,0	Referencia ±1,5
Condición (6)	10	20	100	200	320	0,866 adelanto	
Condición (7)	10	20	100	200	320	0,5 atraso	

Fuente: Norma ANSI C12.1:2018. *Código para la medición de electricidad*. p. 22.

4.2.2.9. Desempeño en condiciones de servicio

Para medidores con fines de facturación en servicio o retirados de servicio se establecen límites de exactitud, planes de prueba y procedimientos de inspección.

La carga de prueba en carga alta debe ser aproximadamente 100 % de la corriente de prueba a factor de potencia unitario, para carga baja debe ser aproximadamente 10 % de la corriente de prueba a factor de potencia unitario y la carga de prueba en factor de potencia debe ser 100 % la corriente de prueba con 50 % de atraso el factor de potencia.

El desempeño de todo medidor de energía es considerado aceptable cuando el porcentaje de registro no es menor de 98 % o mayor de 102 %. Los medidores deben ser ajustados o retirados de servicio cuando el error de registro excede 1 % ya sea en carga baja o carga alta o cuando el error de registro excede 2 % en prueba de factor de potencia.

Prueba encontrada (as-found) significa la exactitud antes de la calibración. La prueba dejada (as-left) significa la exactitud luego de los ajustes realizados al medidor.

4.2.2.10. Determinación del porcentaje de registro

El porcentaje de registro para un medidor de energía es en general diferente en carga alta que en carga baja, y puede tener otros valores en diferentes cargas.

Para determinar el porcentaje de registro de un medidor de energía no es tan sencillo dado que involucra características de la curva de carga del medidor. Varios métodos se usan para determinar un solo valor que represente el porcentaje de registro.

Cuatro métodos son usados para determinar el porcentaje de registro comúnmente llamando exactitud promedio o exactitud promedio final.

4.2.2.11. Método 1

El porcentaje de registro es el promedio ponderado del porcentaje de registro a carga baja (LL) y plena carga (FL), dando un peso de 4 al registro en plena carga.

$$\text{Porcentaje de registro promedio} = \frac{4FL+LL}{5}$$

4.2.2.12. Método 2

El porcentaje de registro promedio es el promedio del porcentaje de registro a carga baja (LL) y a plena carga (FL).

$$\text{Porcentaje de registro promedio} = \frac{FL+LL}{2}$$

4.2.2.13. Método 3

El porcentaje de registro es el registro en un punto específico cuando este punto específico es representativo dentro del rango de operación.

4.2.2.14. Método 4

El porcentaje de registro para medidores polifásicos es el promedio ponderado del porcentaje de registro a carga baja (LL), plena carga (FL) y factor de potencia (PF), dando al registro de plena carga un peso de 4, y al registro de carga baja un peso de 2.

$$\text{Porcentaje de registro promedio} = \frac{4FL+2LL+PF}{7}$$

4.2.3. Norma ANSI C12.10, aspectos físicos para medidores de energía y normas de seguridad

Esta norma considera los aspectos físicos tanto para medidores tipo desmontable (socket) como para medidores tipo bornera (Base). Incluye relaciones, arreglos de conexiones internas, dimensiones pertinentes, datos de placa y otras especificaciones generales.

La tensión y frecuencia típicas son 120, 240, 277 o 480V y 60 Hz. Las clases de corriente normalmente son las listadas en la tabla XIV, aunque puede usarse otros valores para corriente de prueba.

Tabla XIV. Clases de corriente y corrientes de prueba

Clase de corriente	Corriente de prueba
2	0,25A
10	2,5 A
20	2 A
100	15 A
200	30 A
320	50 A

Fuente: Norma ANSI C12.10:2011. *Aspectos físicos de los medidores de Watthour: norma de seguridad.* p. 5.

Se establece la designación de formas típicas, indicando cantidad de elementos, circuitos de corriente, hilos en circuito externo y figuras de conexión.

La placa de datos debe contener la siguiente información:

- Designación de la forma o descripción del circuito (FM)
- Medidor de energía u otra descripción

- Marca del fabricante
- Tipo o modelo del fabricante
- Clase de corriente (CL)
- Clase de exactitud (CA)
- Tensión nominal
- Numero de hilos (W)
- Frecuencia (Hz)
- Corriente de prueba (TA)
- Constante de Wh (Kh)
- Constante de prueba T (Kt)

Para el caso de medición indirecta deben contener la información adicional indicada a continuación:

- Multiplicador (Mult. By)
- Relación de transformación de corriente (CTR)
- Relación de transformación de tensión (VTR)

4.2.4. Norma ANSI C12,20, medidores de energía clases de exactitud 0,1, 0,2 y 0,5

Esta norma establece los criterios de desempeño aceptables para medidores de energía. Cubre aspectos de designación de clase de exactitud, designación de clase de corriente, niveles de tensión y frecuencia, valores de corriente de prueba, arreglos de conexión de servicio, dimensiones, designaciones de forma y pruebas ambientales.

La versión actual de esta norma es la 2015 la cual fue revisada con la intención de proporcionar actualización dado las necesidades de la industria

que ha cambiado en forma dramática debido a cambio de tecnología y requerimientos regulatorios.

Establece aspectos físicos y criterios de desempeño para medidores de energía clase de exactitud 0,1, 0,2 y 0,5. En caso exista diferencia entre esta norma y las versiones actuales de ANSI C12.1 y ANSI C12.10, los requisitos de esta norma deben prevalecer.

4.2.4.1. Requisitos de salida de prueba

Todo medidor debe proveer un medio para obtener una salida de pulso de prueba que es proporcional a la energía. Medidores que son capaces de medir magnitudes integradas en el tiempo como VARh, Vah, V²h, entre otros. Deben proveer un pulso de salida que es proporcional a las cantidades medidas.

Medidores que miden tanto energía entregada como recibida deben proveer una forma para usar el pulso de salida para energía en cualquier dirección. Alguna indicación visual puede indicar que cantidad se encuentra activa.

4.2.4.2. Requisitos de desempeño y condiciones de prueba

El medidor debe estar montado en un soporte libre de vibraciones, todas las pruebas de corriente deben ser suministradas en un circuito con fuentes de onda senoidal, con una distorsión armónica total no mayor al 1 % tanto en corriente como en tensión.

Todas las pruebas, a menos que se indique lo contrario, deben realizarse a 23 °C ± 2 °C, tensión nominal ±1 %, frecuencia nominal ±1 Hz, corriente de prueba ±1 % y factor de potencia unitario 0° ± 2°.

El desempeño del medidor bajo prueba en las condiciones anteriores debe tener un error muy cercano a cero en las condiciones anteriores y en ningún caso debe exceder 0,2 % de error en clase de exactitud 0,5, 0,1 % de error para clase de exactitud 0,2, o 0,05 % de error en clase de exactitud 0,1.

Las pruebas de exactitud pueden realizarse tanto con carga en serie-paralelo como con carga polifásica, a menos que se especifique lo contrario. De cualquier forma se recomienda utilizar carga polifásica para medidores de varios elementos.

Cuando se use carga polifásica, la carga apropiada dependerá en la forma del medidor. Pruebas de exactitud realizadas con carga polifásica deben ser conformes con la configuración de carga según se muestra en la tabla XV.

Tabla XV. **Carga con servicio polifásico usado en prueba de exactitud**

Descripción	Forma designada	Carga típica	Carga alternativa
Dos elementos, auto contenido	12S, 13S, 25S, 32S, 13 ^a	Tres alambres, estrella	<ul style="list-style-type: none"> • Tres alambres, tres fases, delta. • Tres alambres, una fase
Dos elementos, medición indirecta	5S, 26S, 35S, 45S, 56S, 5A, 35A, 45A, 66S	Tres alambres, tres fases, delta	<ul style="list-style-type: none"> • Tres alambres, una fase • Tres alambres, estrella
Tres elementos, auto contenido	16S, 16A	Cuatro alambres, estrella	<ul style="list-style-type: none"> • Cuatro alambres, delta
Tres elementos, auto contenido	17S, 17A	Cuatro alambres, delta	Ninguno
Tres elementos, medición indirecta	11S, 11A	Cuatro alambres, Delta	Ninguno
Tres elementos, medición indirecta	9S, 10S, 39S, 9 ^a , 10A, 48A	Cuatro alambres, estrella	<ul style="list-style-type: none"> • Cuatro alambres, delta

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*

4.2.4.3. Prueba de corriente de arranque

El medidor debe operar continuamente bajo la corriente de carga especificada en la tabla XVI, utilizando el rango de voltaje más bajo.

Tabla XVI. Prueba de corriente de arranque

Clase de corriente	Corriente en amperios		
	Clase exactitud 0.5	Clase exactitud 0.2	Clase exactitud 0.1
2	0,001	0,001	0,001
10	0,01	0,01	0,01
20	0,01	0,01	0,01
100	0,05	0,05	0,05
200	0,10	0,10	0,10
320	0,16	0,16	0,16

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*

p. 9.

4.2.4.4. Prueba de desempeño de carga

Para esta prueba el desempeño del medidor no debe desviarse de la exactitud en condiciones de referencia más allá de los límites indicados en la tabla XVII.

Tabla XVII. Prueba de desempeño de carga

Condición	Corriente en amperios						Máxima desviación en porcentaje desde desempeño de referencia		
	Clase de corriente						Clase de exactitud		
	2	10	20	100	200	320	0,5	0,2	0,1
(1)	0,015	0,15	0,15	1	2	3	±1,0	±0,4	±0,2
(2)	0,025	0,25	0,25	1,5	3	5	±0,5	±0,2	±0,1
(3)	0,05	0,5	0,5	3	6	10	±0,5	±0,2	±0,1
(4)	0,15	1,5	1,5	10	20	30	±0,5	±0,2	±0,1
(5)	0,25	2,5	2,5	15	30	50	Referencia	Referencia	Referencia
(6)	0,5	--	5	30	60	75	±0,5	±0,2	±0,1
(7)	1	5	10	50	100	100	±0,5	±0,2	±0,1
(8)	1,5	7,5	15	75	150	150	±0,5	±0,2	±0,1
(9)	1,8	--	18	90	180	250	±0,5	±0,2	±0,1
(10)	--	10	--	100	200	300	±0,5	±0,2	±0,1
(11)	2	--	20	--	--	320	±0,5	±0,2	±0,1

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*

p. 10.

4.2.4.5. Prueba de efecto de variación de factor de potencia

Cada elemento de un medidor de varios elementos debe ser probado como un elemento individual, pero todos los circuitos de tensión deben estar energizados.

Para medidores de tres elementos el efecto de la variación del factor de potencia sobre el desempeño en la exactitud del medidor no debe exceder lo especificado en la tabla XVIII.

Tabla XVIII. **Efecto de la variación del factor de potencia para medidores de tres elementos**

Condición	Corriente en amperios						Factor de potencia	Máxima desviación desde el desempeño de referencia en %		
	Clase de corriente							Clase exactitud		
	2	10	20	100	200	320		0,5	0,2	0,1
Referencia para Condición (1) Condición (1)	0,05 0,1	0,5 1	0,5 1	3 6	6 12	10 20	0,1 0,5 atraso	Ref ±1,0	Ref ±0,5	Ref ±0,25
Referencia para Condición (2) Condición (2)	1 1	5 5	10 10	50 50	100 100	150 150	0,1 0,5 atraso	Ref ±0,6	Ref ±0,3	Ref ±0,15
Referencia para Condición (3) Condición (3)	2 2	10 10	20 20	100 100	200 200	320 320	0,1 0,5 atraso	Ref ±0,6	Ref ±0,3	Ref ±0,15

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*

p. 12.

4.2.4.6. **Influencia de armónicos y efecto de forma de onda no senoidal**

El propósito de estas pruebas es verificar que el medidor mantiene su exactitud bajo la variación en condiciones de corriente y tensión no senoidal. Hay seis formas de onda sobre las cuales las pruebas deben realizarse.

En general cada prueba consiste en tres partes:

- Establecimiento de una referencia senoidal.
- Tanto tensión senoidal con contenido armónico aplicado a la corriente o corriente senoidal con contenido armónico aplicado a la tensión, bajo estas condiciones, la potencia activa no cambia.

- Armónicos tanto en la tensión como en la corriente, en estas condiciones la potencia activa cambia.

Las mediciones anteriores deben realizarse a una sola tensión, y la corriente de referencia se indica en la tabla XIX, según la clase de exactitud.

Tabla XIX. **Valores de I_{ref} para la corriente**

Condición	I_{ref} (Amperios RMS) de la fundamental					
	Clase de corriente					
	2	10	20	100	200	320
I_{ref}	0,25	2,5	2,5	15	30	50

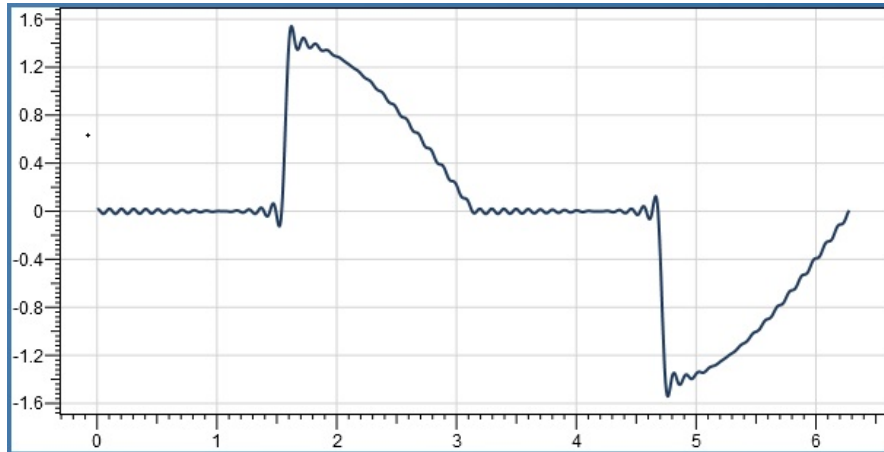
Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.
p. 22.

4.2.4.7. Prueba núm. 39 forma de onda 90 grados cortada

Esta prueba debe realizarse a tensión de referencia con forma de onda senoidal, y corriente con amplitud de referencia con forma de onda senoidal. Una segunda prueba debe realizarse con la misma forma de onda de tensión pero con la forma de onda de corriente indicada en la figura 41.

En esta forma de onda, la corriente I_{prueba} es cero de 0 a 90 grados, dos veces I_{ref} de 90 a 180 grados, cero de 180 a 270 grados y dos veces I_{ref} de 270 a 360 grados.

Figura 41. Forma de onda 90° cortada



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot.

El efecto de la influencia armónica utilizando la forma de onda 90 grados cortada sobre el desempeño de exactitud del medidor no debe exceder lo indicado en la tabla XX.

Tabla XX. **Requerimiento de desempeño con forma de onda 90 grados cortada**

Condición	Forma de onda de tensión	Forma de onda de corriente	Máxima desviación desde el desempeño de referencia en %		
			Clase de exactitud		
			0,5	0,2	0,1
(1)	V_{ref} senoidal	I_{ref} senoidal	Referencia	Referencia	Referencia
(2)	V_{ref} senoidal	forma de onda 90 grados cortada	±0,5 %	±0,3 %	±0,2 %

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*

p. 23.

4.2.4.8. Prueba núm. 40 forma de onda cuadrada

En esta prueba se realizan dos mediciones, tensión senoidal con corriente armónica y tensión armónica con corriente armónica. Los armónicos de corriente y tensión están definidos en la tabla XXI. En la figura 42 se muestra la forma de onda de corriente para esta prueba.

El efecto de la influencia armónica utilizando la forma de onda cuadrada sobre el desempeño de exactitud del medidor no debe exceder lo indicado en la tabla XXII.

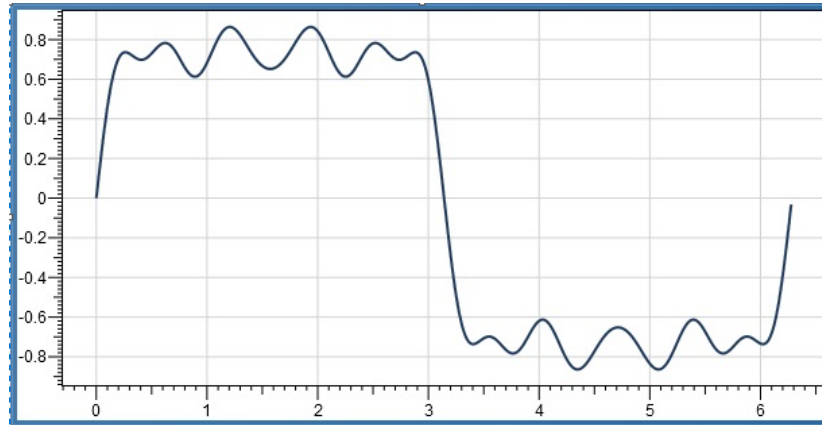
Tabla XXI. Forma de onda cuadrada

Armónico	Amplitud de tensión % V_{ref}	Angulo de fase	Amplitud de corriente % I_{ref}	Angulo de fase	Demanda
1	100	0	100	0	100,000
3	3,8	180	30	0	-1,140
5	2,4	180	18	0	-0,432
7	1,7	180	14	0	-0,238
11	1,1	180	9	0	-0,099
13	0,8	180	5	0	-0,040
					98,051

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*

p. 24.

Figura 42. Forma de onda cuadrada en corriente



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot.

Tabla XXII. Requerimiento de desempeño con forma de onda cuadrada

Condición	Forma de onda de tensión	Forma de onda de corriente	Máxima desviación desde el desempeño de referencia en %		
			Clase de exactitud		
			0.5	0.2	0.1
(1)	V_{ref} senoidal	I_{ref} senoidal	Referencia	Referencia	Referencia
(2)	V_{ref} senoidal	Forma de onda cuadrada	±0,5%	±0,3%	±0,2%
(3)	Forma de onda cuadrada	Forma de onda cuadrada	±0,8%	±0,5%	±0,3%

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*

p. 25.

4.2.4.9. Prueba núm. 41 forma de onda pico

En esta prueba se realizan dos mediciones, tensión senoidal con corriente armónica, y tensión armónica con corriente armónica. Las armónicas de tensión y corriente se definen en la tabla XXIII. En la figura 43 se muestra la forma de onda de corriente para esta prueba.

El efecto de la influencia armónica utilizando la forma de onda pico sobre el desempeño de exactitud del medidor no debe exceder lo indicado en la tabla XXIII.

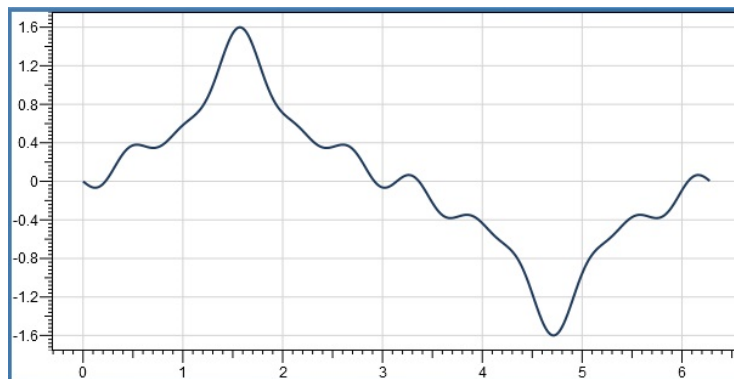
Tabla XXIII. **Forma de onda pico**

Armónico	Amplitud de tensión % V_{ref}	Angulo de fase	Amplitud de corriente % I_{ref}	Angulo de fase	Demanda
1	100	0	100	0	100,000
3	3,8	0	30	180	-1,140
5	2,4	180	18	0	-0,432
7	1,7	0	14	180	-0,238
11	1,1	0	9	180	-0,099
13	0,8	180	5	0	-0,040
					98,051

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*

p. 25.

Figura 43. **Forma de onda pico en corriente**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot.

Tabla XXIV. **Requerimiento de desempeño con forma de onda pico**

Condición	Forma de onda de tensión	Forma de onda de corriente	Máxima desviación desde el desempeño de referencia en %		
			Clase de exactitud		
			0.5	0.2	0.1
(1)	V_{ref} senoidal	I_{ref} senoidal	Referencia	Referencia	Referencia
(2)	V_{ref} senoidal	Forma de onda pico	±0,5 %	±0,3 %	±0,2 %
(3)	Forma de onda pico	Forma de onda pico	±0,8 %	±0,5 %	±0,3 %

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*
p. 26.

4.2.4.10. Prueba núm. 42 forma de onda pulso

En esta prueba se realizan dos mediciones, tensión senoidal con corriente armónica, y tensión armónica con corriente armónica. Las armónicas de tensión y corriente se definen en la tabla XXV. En la figura 44 se muestra la forma de onda de corriente para esta prueba.

El efecto de la influencia armónica utilizando la forma de onda pulso sobre el desempeño de exactitud del medidor no debe exceder lo indicado en la tabla XXVI.

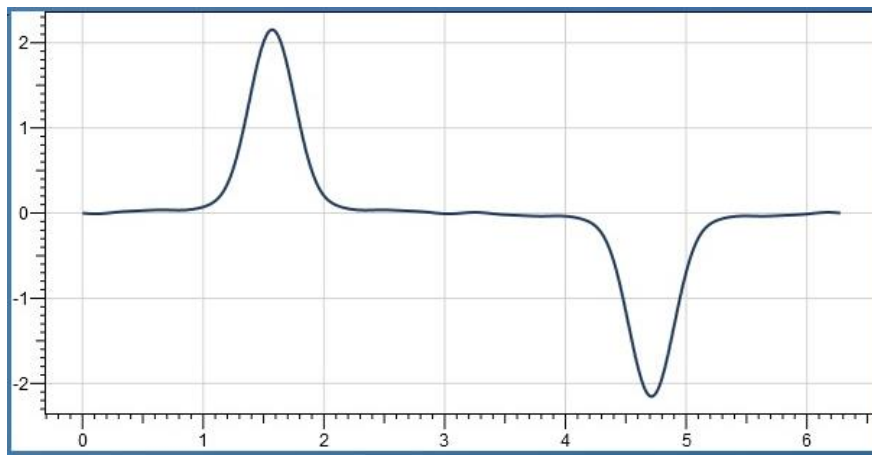
Tabla XXV. **Forma de onda pulso**

Armónico	Amplitud de tensión % V_{ref}	Angulo de fase	Amplitud de corriente % I_{ref}	Angulo de fase	Demanda
1	100	0	100	0	100,000
3	3,8	0	80	180	-3,040
5	2,4	180	60	0	-1,440
7	1,7	0	40	180	-0,680
9	1,5	180	22	0	-0,330
11	1,1	0	12	180	-0,132
13	0,8	180	5	0	-0,040
15	0,6	0	2	180	-0,012
17	0,4	180	1	0	-0,004
19	0,3	0	0,5	180	-0,0015
					94,321

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*

p. 27.

Figura 44. **Forma de onda pulso en corriente**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot.

Tabla XXVI. **Requerimiento de desempeño con forma de onda pulso**

Condición	Forma de onda de tensión	Forma de onda de corriente	Máxima desviación desde el desempeño de referencia en %		
			Clase de exactitud		
			0.5	0.2	0.1
(1)	V_{ref} senoidal	I_{ref} senoidal	Referencia	Referencia	Referencia
(2)	V_{ref} senoidal	Forma de onda pulso	±0,5 %	±0,3 %	±0,2 %
(3)	Forma de onda pulso	Forma de onda pulso	±0,8 %	±0,5 %	±0,3 %

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*

p. 28.

4.2.4.11. Prueba núm. 43 forma onda de corriente con múltiple cruce de cero

Esta prueba es realizada para determinar si el medidor sigue manteniendo exactitud si la forma de onda de corriente contiene múltiples cruces de cero. La prueba se realiza con forma de onda senoidal en la tensión con amplitud V_{ref} . La corriente se define en la tabla XXVII. En la figura 45 se muestra la forma de onda de corriente para esta prueba.

El efecto de la influencia armónica utilizando la forma de onda de corriente con múltiple cruce de cero sobre el desempeño de exactitud del medidor no debe exceder lo indicado en la tabla XXVIII.

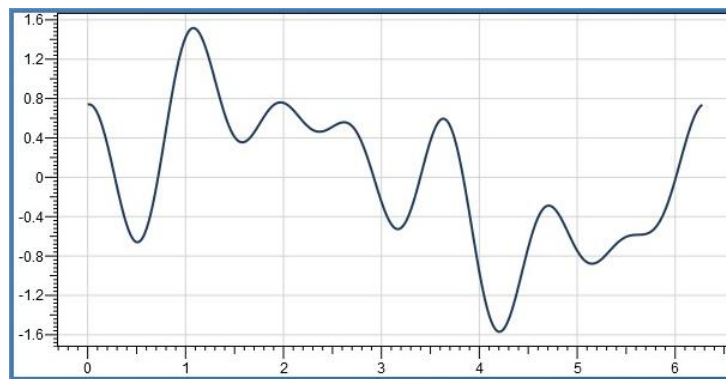
Tabla XXVII. **Forma de onda de corriente con múltiple cruce de cero**

Armónico	Amplitud de tensión % V_{ref}	Angulo de fase	Amplitud de corriente % I_{ref}	Angulo de fase	Demanda
1	100	0	100	0	100.000
2	0	0	5 ±1	90 ±2	0
3	0	0	18 ±2	-160 ±2	0
4	0	0	10 ±2	110 ±2	0
5	0	0	66 ±3	130 ±2	0
7	0	0	50 ±3	50 ±2	0

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*

p. 28.

Figura 45. **Forma de onda de corriente con múltiple cruce de cero**



Fuente: elaboración propia, QtiPlot.

Tabla XXVIII. **Requerimiento de desempeño con forma de onda de corriente con múltiple cruce de cero**

Condición	Forma de onda de tensión	Forma de onda de corriente	Máxima desviación desde el desempeño de referencia en %		
			Clase de exactitud		
			0.5	0.2	0.1
(1)	V_{ref} senoidal	I_{ref} senoidal	Referencia	Referencia	Referencia
(2)	V_{ref} senoidal	Forma de onda corriente con múltiple cruce de cero	±0,5%	±0,3%	±0,2%

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015 *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*
p. 28.

4.2.4.12. Prueba núm. 44 forma de onda de tensión con múltiple cruce de cero

Esta prueba es realizada para determinar si el medidor sigue manteniendo exactitud si la forma de onda de tensión contiene múltiples cruces de cero. La prueba se realiza con forma de onda senoidal en la corriente con amplitud I_{ref} . La tensión se define en la tabla XXIX. En la figura 46 se muestra la forma de onda de tensión para esta prueba.

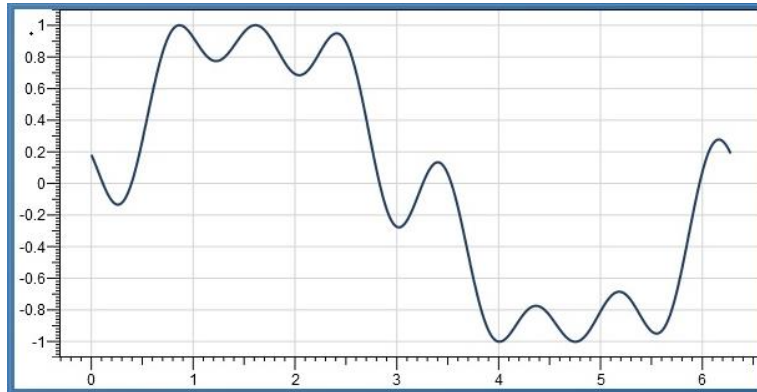
El efecto de la influencia armónica utilizando la forma de onda de tensión con múltiple cruce de cero sobre el desempeño de exactitud del medidor no debe exceder lo indicado en la tabla XXX.

Tabla XXIX. **Forma de onda de tensión con múltiple cruce de cero**

Armónico	Amplitud de tensión % V_{ref}	Angulo de fase	Amplitud de corriente % I_{ref}	Angulo de fase	Demanda
1	100	0	100	0	100,000
3	0	0	0	0	0
5	20 ±2	155 ±5	0	0	0
7	25 ±4	155 ±5	0	0	0

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*
p. 29.

Figura 46. **Forma de onda de tensión con múltiple cruce de cero**



Fuente: elaboración propia, QtiPlot.

Tabla XXX. **Requerimiento de desempeño con forma de onda de tensión con múltiple cruce de cero**

Condición	Forma de onda de tensión	Forma de onda de corriente	Máxima desviación desde el desempeño de referencia en %		
			Clase de exactitud		
			0.5	0.2	0.1
(1)	V_{ref} senoidal	I_{ref} senoidal	Referencia	Referencia	Referencia
(2)	Forma de onda tensión con múltiple cruce de cero	I_{ref} senoidal	±0,5 %	±0,3 %	±0,2 %

Fuente: Norma ANSI C12.20:2015. *Medidores de electricidad: clases de precisión 0.1, 0.2 y 0.5.*
p. 28.

4.3. Normas aplicables a calidad de potencia

En Guatemala no existe una norma nacional sobre calidad de potencia o distorsión armónica, por lo que es muy común aplicar normas IEC.

4.3.1. Norma IEC 61000-4-30:2003 técnicas de ensayo y medición métodos de medición de calidad de potencia

Esta norma define los métodos de medición e interpretación de resultados para parámetros de calidad de potencia en sistemas de suministro de energía en 50 o 60 Hz corriente alterna.

Los métodos de medición se describen para cada tipo relevante de parámetros en términos de posibilitar la obtención de resultados fiables, independientemente del instrumento utilizado e independientemente de las condiciones ambientales. Esta norma da las directrices para los métodos de medición en sitio.

La medición de los parámetros cubiertos por esta norma se limita a aquellos fenómenos que pueden ocurrir en un sistema de potencia, incluyendo parámetros de tensión y corriente apropiadamente.

Los parámetros de calidad de potencia considerados en esta norma son:

- Frecuencia del sistema
- Magnitud de la tensión de alimentación
- Parpadeo (*Flicker*)
- Caídas y subidas de la tensión de alimentación (Sag y Swell)
- Interrupciones de tensión
- Transitorios de tensión
- Desbalances de la tensión de suministro
- Armónicos e inter armónicos de corriente y tensión

Esta norma es una especificación del desempeño, no una especificación de diseño. Los ensayos de incertidumbre en el rango de las cantidades de influencia determinan los requerimientos de desempeño. Proporciona métodos de medición pero no umbrales.

4.3.1.1. Clases de rendimiento de medición

Para cada parámetro medido, se definen dos clases de desempeño de medición:

- Desempeño clase A, se utiliza cuando son necesarias mediciones precisas, para aplicaciones contractuales, verificando el cumplimiento de normas, resolviendo disputas, entre otros. Cualquier medición de un parámetro realizado con dos instrumentos diferentes conforme a los

requerimientos de clase A, cuando se mide la misma señal, producirá resultados acordes dentro de la incertidumbre especificada.

- Desempeño clase B, se puede utilizar para encuestas estadísticas, resolución de problemas y otras aplicaciones donde no se requiere un nivel bajo de incertidumbre.

4.3.1.2. Parámetros de armónicos de tensión

La medida básica de los armónicos de voltaje hace referencia a la norma IEC 61000-4-7:2002 clase 1. Esta norma se utilizará para cada intervalo de medición que es de 12 ciclos para un sistema de 60 Hz.

4.4. Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD)

En el reglamento de la Ley General de Electricidad se establece que la Comisión Nacional de Energía Eléctrica CNEE es la responsable de la elaboración de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución. El objetivo de estas normas es establecer derechos y obligaciones de los suministradores y usuarios del servicio eléctrico de distribución.

Adicional establecer índices o indicadores de referencia para calificar la calidad con que se suministran los servicios de energía eléctrica, tanto en el punto de entrega como en el punto de utilización. Define tolerancias permisibles, métodos de control, indemnizaciones, sanciones y multas.

4.4.1. Evaluación de la calidad del producto suministrado por el distribuidor

La evaluación de la calidad del producto suministrado por el distribuidor será realizado por el propio distribuidor y supervisado por CNEE para identificar las no conformidades con las tolerancias permitidos respecto a los parámetros establecidos para: regulación de tensión, desbalance de tensión en servicios trifásicos, distorsión armónica y parpadeo (*flicker*).

4.4.2. Evaluación de la incidencia del usuario en la calidad del producto

La incidencia del usuario en la calidad del producto será evaluada por el propio distribuidor para verificar la conformidad de las tolerancias establecidas respecto a distorsión armónica, parpadeo (*flicker*), y factor de potencia.

4.4.3. Período de medición

El control de la calidad del producto debe ser efectuado por los distribuidores mediante mediciones mensuales, en la cantidad de puntos establecidos por esta norma, con equipos especializados y aprobados.

Período de medición se denomina al lapso mínimo para la medición de los parámetros de calidad de producto, y es de 7 días continuos.

Intervalo de medición se denomina al intervalo en que deben ser medidos los parámetros, se identifica como lapso (*k*). Para regulación de tensión y desbalance de tensión será de 15 minutos. Para el caso de distorsión armónica y parpadeo el intervalo será de 10 minutos.

En caso de ser necesario o ante reclamo de algún usuario deberá hacerse mediciones adicionales en el punto de red objeto del reclamo utilizando los mismos períodos e intervalos de medición.

4.4.4. Regulación de tensión

Los valores de tensión registrados se utilizarán para la determinación de los índices o indicadores, se analizarán con base a las desviaciones del valor nominal medido.

El índice para evaluar la tensión en el punto de entrega del distribuidor al usuario, en un intervalo de medición k será el valor absoluto de la diferencia ΔV_k entre la media de los valores eficaces RMS de tensión V_k y el valor de la tensión nominal V_n , expresado como un porcentaje de la tensión nominal:

$$\Delta V_k (\%) = \frac{|V_k - V_n|}{V_n} \cdot 100$$

Los índices o indicadores se calculan en relación a las tolerancias admisibles, según el tipo de usuario y la tensión nominal. En la tabla XXXI se establece las tolerancias:

Tabla XXXI. **Tolerancia admisible respecto al valor nominal en %**

Tensión	Servicio urbano	Servicio rural
Baja	8	10
Media	6	7
Alta	5	5

Fuente: Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica, CNEE. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución, NTSD*. p. 37.

Para usuarios en baja tensión deberá hacerse una medición por cada circuito alimentador o salida de la subestación. Para usuarios en media y alta tensión deberá hacerse una medición por cada veinticinco usuarios con servicio contratado en esa tensión.

4.4.5. Desbalance de tensión en los servicios trifásicos

Para determinar el desbalance de tensión en servicios trifásicos, el indicador se calcula con base a la comparación de los valores eficaces o RMS de tensión en cada fase, medidos en el punto de entrega y registrados en cada intervalo de medición (k), se expresa como un porcentaje, según la siguiente fórmula:

$$\Delta DT(\%) = 3 \cdot \left[\frac{(V_{max} - V_{min})}{V_a + V_b + V_c} \right] \cdot 100$$

Donde:

- $\Delta DT(\%)$ = porcentaje de desbalance de tensión.
- V_{max} = tensión máxima de cualquiera de las tres fases, registrada en el intervalo de medición (k).
- V_{min} = tensión mínima de cualquiera de las tres fases, registrada en el intervalo de medición (k).
- V_a = tensión de la fase a, registrada en el intervalo de medición (k).
- V_b = tensión de la fase a, registrada en el intervalo de medición (k).
- V_c = tensión de la fase a, registrada en el intervalo de medición (k).

La tolerancia que se admite sobre el desbalance de tensión en los puntos de entrega es la indicada en la tabla XXXII.

Tabla XXXII. **Tolerancias para desbalance de tensión trifásico**

Tensión	Desbalance de tensión ΔDT en %
Baja y Media	3
Alta	1

Fuente: Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica, CNEE. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución, NTSD*. p. 37.

El número de mediciones será en igual cantidad y podrán ser los mismos puntos utilizados para el control de la regulación de tensión en los servicios trifásicos.

Si en un lapso mayor al cinco por ciento del total del período de medición las mediciones han excedido el rango de tolerancias establecidas, se considera que la energía eléctrica es de mala calidad.

4.4.6. Distorsión armónica de la tensión generada por el distribuidor

Para evaluar los niveles de distorsión armónica, el indicador está dado por la distorsión armónica de tensión, expresado como un porcentaje y se calcula con las fórmulas indicadas a continuación:

$$D_{ATT} = \sqrt{\sum \frac{v_i^2}{v_1^2}} \cdot 100$$

$$D_{AIT} = \frac{v_i}{v_1}$$

Donde:

D_{ATT} = distorsión armónica total de tensión

D_{AIT} = distorsión armónica individual de tensión

v_i = componente de tensión de la armónica de orden i

v_1 = componente de tensión de la frecuencia fundamental (60 Hz)

La tolerancia que se admite sobre la distorsión armónica de la tensión se indica en la tabla XXXIII.

Tabla XXXIII. Tolerancias para la distorsión armónica de la tensión

Orden de la armónica (n)	Distorsión armónica individual de tensión, D_{AIT} (%)	
	Baja y media tensión $V \leq 60$ kV	Alta tensión 60 kV $\leq V \leq 230$ kV
Impares no múltiplos de 3		
5	6,0	2,0
7	5,0	2,0
11	3,5	1,5
13	3,0	1,5
17	2,0	1,0
19	1,5	1,0
23	1,5	0,7
25	1,5	0,7
>25	$0,2 + 1,3 \cdot 25/n$	$+0,6 \cdot 25/n$
Impares múltiplos de 3		
3	5,0	2,0
9	1,5	1,0
15	0,3	0,3
21	0,2	0,2
>21	0,2	0,2
Pares		
2	2,0	2,0
4	1,0	1,0
6	0,5	0,5
8	0,5	0,4
10	0,5	0,4
12	0,2	0,2
>12	0,2	0,2
Distorsión armónica total de tensión D_{ATT} (%)	8	3

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica, CNEE. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución, NTSD*. p. 40.

Cuando en un lapso mayor al cinco por ciento correspondiente al período de medición, las mediciones muestran que la distorsión armónica de tensión ha excedido el rango de tolerancia se considera que la energía eléctrica es de mala calidad.

Una medición se considera fuera de la tolerancia establecida, si se excede el valor de la distorsión armónica individual o el valor de la distorsión armónica total. Para efectos de esta norma se considerará hasta la armónica de orden 40.

4.4.7. Distorsión armónica de la corriente generada por el usuario

Para evaluar los niveles de distorsión armónica el indicador está dado por la distorsión armónica de la corriente de carga medida en el punto de conexión. Para tensiones mayores de 1 kV y potencias de carga mayores a 10 kW, se utiliza:

$$D_{ATI} = \sqrt{\sum \frac{I_i^2}{I_1^2}} \cdot 100$$

$$D_{AII} = \frac{I_i}{I_1}$$

Donde:

D_{ATI} = distorsión armónica total de corriente

D_{AII} = distorsión armónica individual de corriente

I_i = componente de la intensidad de corriente de la armónica de orden i

I_1 = componente de la intensidad de corriente de la frecuencia fundamental (60 Hz)

Para tensiones menores de 1 kV y potencias de carga menores de 10 kW, se utiliza:

$$\Delta I_i = (I_{i \text{ carga}} - I_{i \text{ límite}})$$

Donde:

$I_{i \text{ límite}}$ = límite de tolerancia establecida para la intensidad armónica.

La tolerancia que se admite sobre la distorsión armónica de corriente individual para distintos niveles de tensión, potencia máxima demandada y orden armónica se indica en la tabla XXXIV:

Tabla XXXIV. **Tolerancias para la distorsión armónica de corriente**

Orden de la armónica (N)	$P \leq 10 \text{ kW}$ $V \geq 1 \text{ kV}$	$P > 10 \text{ kW}$ $1 \text{ kV} < V \leq 60 \text{ kV}$	$P > 50 \text{ kW}$ $V > 60 \text{ kV}$
	Intensidad armónica máxima (A)	Distorsión armónica Individual de corriente D_{AI} en %	
Impares no múltiplos de 3			
5	2,28	12,0	6,0
7	1,54	8,5	5,1
11	0,66	4,3	2,9
13	0,42	3,0	2,2
17	0,26	2,7	1,8
19	0,24	1,9	1,7
23	0,20	1,6	1,1
25	0,18	1,6	1,1
>25	4,5/N	$0,2 + 0,8 \cdot 25/N$	0,4

Continuación de la tabla XXXIV.

Impares múltiplos de 3			
3	4,60	16,6	7,5
9	0,80	2,2	2,2
15	0,30	0,6	0,8
21	0,21	0,4	0,4
>21	4,5/N	0,3	0,4
Pares			
2	2,16	10,0	10,0
4	0,86	2,5	3,8
6	0,60	1,0	1,5
8	0,46	0,8	0,5
10	0,37	0,8	0,5
12	0,31	0,4	0,5
>12	3,68/N	0,3	0,5
Distorsión armónica total de corriente D_{ATI} en %	--	20	12

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica, CNEE. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución, NTSD*. p. 43.

Cuando en un lapso mayor al cinco por ciento correspondiente al período de medición, las mediciones muestran que la distorsión armónica de la corriente de carga ha excedido el rango de tolerancia se considera que la energía eléctrica es de mala calidad.

El control de la generación de armónicos por los usuarios será responsabilidad de los distribuidores, realizando mediciones en los puntos que considere necesarios. Las mediciones deberán ser realizadas de acuerdo con la norma IEC 61000-4-7 registrando la distorsión armónica total y la distorsión armónica individual de corriente, así como la corriente de carga.

4.5. Norma NCC-14, Habilitación comercial para operar en el Mercado Mayorista y Sistema de Medición Comercial

En esta norma se establece las características del sistema y de los equipos que formarán parte del sistema de medición comercial que utilizará el Administrador de Mercado Mayorista para liquidar las transacciones comerciales.

Se establecen los requisitos y procedimientos indispensables para que un agente o gran usuario pueda realizar transacciones en el mercado. De la misma forma, se establece las características del sistema de medición que formarán parte del Sistema de Medición Comercial Regional (SIMECR) que utilizará el Ente Operador Regional (EOR) para liquidar las transacciones en el Mercado Eléctrico Regional (MER).

Se definen los responsables de la instalación, operación y mantenimiento de los equipos de medición y comunicaciones, dependiendo si son participantes transportistas, generadores, distribuidores o grandes usuarios.

Para los grandes usuarios con potencias entre 100 y 500 kW la medición podrá ser ubicada del lado de alta o baja tensión del banco de transformación. Para el caso que esté instalado en el lado de baja y el transformador sea propiedad del gran usuario deberá compensarse las pérdidas a través del programa y algoritmo disponible en el equipo de medición.

Para demandas de potencia superiores a 500 kW la medición deberá instalarse en el lado primario del banco de transformación.

4.5.1. Elementos del equipo de medición

El equipo de medición comercial está conformado por los transformadores de instrumento de tensión, transformadores de instrumento de corriente, medidor oficial, medidor de respaldo cuando aplique, equipo de comunicaciones, herrajes y protecciones que sea necesario dependiendo de la ubicación de la medición.

4.5.2. Medidores

Cada punto de medición deberá contar con dos medidores de energía independientes, uno oficial y el otro de respaldo. Para los puntos de medición con una demanda igual o menor a 500 kW no es obligatoria la instalación del medidor de respaldo. Estos pueden estar conectados al mismo juego de transformadores de medida.

En puntos con flujo de potencia tanto entregando como recibiendo deberá instalarse medidores que registren el flujo de energía en ambos sentidos, siendo para estos casos obligatorio el medidor de respaldo.

Los medidores deberán cumplir con las normas IEC 687 o ANSI C12.20; la clase de exactitud deberá ser 0,2 % y el número de elementos de medición deberá ser 3.

Las magnitudes que deben registrar los medidores son:

- Registro acumulado de energía activa entregada o recibida
- Registro acumulado de energía reactiva entregada o recibida
- Potencia activa máxima entregada o recibida

- Potencia reactiva máxima entregada o recibida
- Potencia activa instantánea entregada o recibida
- Factor de potencia instantáneo
- Voltaje instantáneo en fases

De los registros anteriores deberá almacenarse la energía activa entregada y recibida, energía reactiva entregada y recibida, potencia activa máxima entregada y recibida.

La información deberá ser registrada y almacenada por el medidor en canales independientes en períodos ajustables entre 15 y 60 minutos. El registrador deberá tener memoria no volátil que permita almacenar la información de por lo menos 37 días. Deberé contar con batería incorporada para mantener los datos almacenados en memoria por lo menos durante 7 días ante la falta de alimentación.

La sincronización del reloj del medidor será responsabilidad de cada participante de acuerdo al patrón de hora generado por un dispositivo de alta precisión como un GPS o similar que determine el AMM. La sincronización se deberá realizar cuando se constate que el reloj esté desfasado más o menos 1 minuto respecto al patrón. El AMM podrá verificar la sincronización de los medidores cada 3 meses.

4.5.3. Transformadores de instrumento

Los transformadores de instrumento deberán ser para medición y no podrá utilizarse transformadores de protección para fines de medición. Cada punto de medición deberá contar con los correspondientes transformadores de tensión y de corriente.

Los transformadores de medida deberán cumplir con las normas IEC 185, 186, 044-1 o ANSI C57.13.

Para puntos de conexión de generadores, transportistas, distribuidoras y grandes usuarios en tensiones mayores de 69kV las especificaciones de exactitud y burden se indican en la tabla XXXV.

Tabla XXXV. Exactitud y burden en puntos de medición mayores de 69 kV

	IEC 185/186/044-1		ANSI C57.13	
	Clase de exactitud (%)	Carga (Burden)	Clase de exactitud (%)	Carga (Burden)
PT	0,2	100 VA	0,3	75 VA
CT	0,2	50 VA	0,3	45 VA

Fuente: Norma de Coordinación Comercial 14 AMM. *Habilitación comercial para operar en el Mercado Mayorista y Sistema de Medición Comercial*. p.4.

Para puntos de conexión de generadores, transportistas, distribuidoras y grandes usuarios en tensiones iguales o menores a 69kV las especificaciones de exactitud y burden se indican en la tabla XXXVI.

Tabla XXXVI. **Exactitud y burden en puntos de medición igual o menor a 69kV**

ANSI C57.13		
	Clase de exactitud (%)	Carga (Burden)
Entre 69 y 13.8 kV		
PT	0,3	75 VA
CT	0,3	22,5 VA
13,8 kV		
PT	0,3	75 VA
CT	0,3	12,5 VA

Fuente: Norma de Coordinación Comercial 14 AMM. *Habilitación comercial para operar en el Mercado Mayorista y Sistema de Medición Comercial*. p.5.

4.5.4. Comunicaciones

Cada medidor o registrador oficial deberá contar con un medio de comunicación *Ethernet* con enlace IP disponible en todo momento, para poder efectuar consultas o lecturas remotas desde las instalaciones del AMM. Además deberá tener la posibilidad de comunicación con una computadora por medio de conexión con cable, puerto óptico o cualquier otro dispositivo inalámbrico, de tal forma que se pueda recolectar la información del medidor oficial y de respaldo sin cortar los precintos de seguridad y control.

El protocolo de comunicaciones, el formato de la información y la programación deberán ser compatibles con los que disponga el AMM. De lo contrario el participante será responsable de proveer al AMM los equipos y la programación necesarios para que el punto de medición pueda ser interrogado desde las instalaciones del AMM.

4.5.5. Verificaciones periódicas

El Administrador del Mercado Mayorista efectuará verificaciones periódicas a los medidores e instalaciones asociadas de los participantes por lo menos una vez cada año. La verificación podrá ser efectuada por empresas calificadas o por el mismo AMM. Si en el momento de la prueba se determina que alguna condición no es la adecuada, la misma deberá de repetirse en una fecha próxima.

Las causas para que se re programe la verificación pueden ser:

- Una variación de corriente de carga instantánea arriba del 30 % en un lapso de 30 segundos o tiempo promedio de un pulso del medidor.
- Que la corriente de carga sea menor al 10 % de la corriente nominal secundaria.

Si el resultado de la verificación periódica muestra inexactitud e imprecisión en la medición de la energía, incumplimiento de los requisitos de instalación o precintos con alteración, rotos o ausentes se debe seguir el procedimiento indicado en la norma.

Si la medición realizada muestra un error que supera el rango de ± 3 % respecto al resultado del patrón se notificará al participante los resultados de la verificación y el AMM coordinará el retiro del medidor para realizarle pruebas en Laboratorio. El participante deberá proporcionar otro medidor y este debe tener certificado de calibración con fecha no mayor de 6 meses de vigencia.

Si la medición realizada muestra un error menor de ± 3 % pero mayor de ± 2 % el AMM informará al participante y este puede optar por el envío del

medidor al Laboratorio designado o solicitar una verificación no periódica en un período de 10 días hábiles, haciendo el pago correspondiente.

Si en la segunda verificación el resultado obtenido el error excede el rango de ± 2 % en dicha fecha se deberá retirar el medidor para realizarle pruebas en el Laboratorio designado y dejar instalado un medidor que debe tener certificado de calibración con fecha no mayor a 6 meses de vigencia.

En cualquiera de los casos anteriores el plazo para el cambio de medidor será no mayor a 6 semanas a partir de la fecha de la verificación periódica.

El equipo a utilizar para realizar las verificaciones, como mínimo debe incluir lo siguiente:

- Equipo patrón con un error de exactitud de 0,05% y un período de calibración no mayor a 1 año, incluyendo sensor de indicador de pulsos o revoluciones del medidor. Capacidad de medir potencia activa, reactiva, aparente y sus respectivas energías, factor de potencia, corrientes, tensiones, desbalances, frecuencia, medición de error, despliegue de diagrama vectorial.
- Multímetro.
- Amperímetro de gancho para media y baja tensión.
- Cables con terminales y herramienta para realizar conexiones.
- Precintos.
- GPS.

El procedimiento detallado paso a paso de las acciones y pasos a seguir para efectuar la verificación en sitio se especifica en el anexo 1 de la norma NCC-14.

4.5.6. Pruebas en laboratorio para medidores

Las pruebas se realizan en Laboratorios designados por el Administrador del Mercado Mayorista y deberán efectuarse en presencia de los representantes del participante. La prueba inicia al momento de desempacar el medidor y luego cortar los precintos del mismo. Se aplicará carga trifásica controlada con diferentes magnitudes y variando el factor de potencia, comparando el resultado con un equipo patrón que deberá tener una exactitud de 0,05 %.

Los puntos de prueba son los siguientes:

- 2,5 amperios con factor de potencia 1,0
- 2,5 amperios con factor de potencia 0,5
- 0,25 amperios con factor de potencia 1,0

El error en la medición se calculará de la siguiente manera:

$$Err = \frac{M_{IBC} - M_p}{M_p} \cdot 100$$

Donde:

Err = porcentaje de error de medición

M_{IBC} = medición del medidor bajo prueba

M_p = medición del patrón

Cuando alguna de las 3 pruebas de un resultado fuera del rango de $\pm 0,2$ % se deberá aplicar el ajuste de energía con el valor del error calculado para esa prueba que se aleje más del rango de la norma.

4.5.7. Verificaciones no periódicas

La verificación de uno o varios medidores puede ser solicitado en cualquier momento por cualquier participante del mercado, o bien el AMM solicitarlo a cualquiera de los participantes. Para el caso de los usuarios conectados al sistema de transporte, el AMM efectuará por lo menos una vez al año una verificación no periódica.

Otras causas por las cuales se deberá realizar una verificación no periódica son cada vez que se va habilitar un punto de medición nuevo, cada vez que un gran usuario cambie de comercializador o requiera cortar los precintos para efectuar cambio o mantenimiento en las instalaciones.

4.6. Norma COGUANOR NTG/ISO/IEC 17025 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración

La norma NTG/ISO/IEC 17025:2017 contiene todos los requisitos que debe cumplir un laboratorio de ensayo y calibración para demostrar competencias técnicas, que posee un sistema de gestión y es capaz de generar resultados técnicamente válidos.

Un laboratorio que posea acreditación de esta norma, es reconocido internacionalmente y los certificados que emita son válidos y aceptados en todos los países que tienen representación en el comité ISO.

Los laboratorios que cumplen con esta norma operarán en general de acuerdo a los principios de la norma ISO 9001. La tercera edición anula y sustituye a la segunda edición que data del año 2005.

En Guatemala actualmente se encuentra en el período de transición y todos los laboratorios que poseen esta acreditación deben ajustar su sistema de gestión con las modificaciones.

Actualmente existen en Guatemala varios laboratorios con esta acreditación, pero solamente hay uno con alcance para magnitudes eléctricas.

Dentro de los principales cambios respecto a la versión anterior se encuentra el pensamiento basado en riesgo, una mayor flexibilidad en los requisitos de procesos, procedimientos, información documentada y responsabilidades organizacionales.

Al abordar los riesgos y las oportunidades se establece una base para incrementar la eficacia del sistema de gestión, logrando mejores resultados y prevenir efectos no deseados.

4.6.1. Imparcialidad

El laboratorio debe demostrar imparcialidad en sus resultados, no se debe permitir presiones comerciales, financieras, económicas u otras que comprometan los resultados. La dirección del laboratorio debe estar comprometida para velar por esta imparcialidad. Todo personal del laboratorio sea interno o externo debe actuar de manera imparcial.

4.6.2. Confidencialidad

El laboratorio debe ser responsable de la gestión de toda la información obtenida o creada durante las actividades del laboratorio por medio de acuerdos legalmente ejecutables.

El personal del laboratorio, incluyendo contratistas, personal de organismos externos o personas que actúen en nombre del laboratorio deben mantener la confidencialidad de toda la información obtenida en las actividades del laboratorio. Si en caso el Laboratorio es requerido por ley para revelar información confidencial, se debe notificar al cliente o a la persona interesada la información proporcionada.

4.6.3. Alcance

El laboratorio debe definir y documentar el alcance de las actividades que cumplen con la acreditación. En el sitio web de la Oficina Guatemalteca de Acreditación se encuentra publicado el alcance para el cual se encuentra acreditado cada laboratorio.

4.6.4. Personal

Se debe documentar los requisitos de competencia para cada función, incluyendo educación, calificación, formación, conocimiento técnico, experiencia y habilidades.

Dentro de los procedimientos se debe establecer y conservar registros para los requisitos de competencia, selección de personal, formación, capacitaciones, autorizaciones y el seguimiento de la competencia.

4.6.5. Instalaciones y condiciones ambientales

Las instalaciones y condiciones ambientales deben ser las adecuadas y no afectar la validez de los resultados. Se debe documentar los requisitos con que debe contar las instalaciones para realizar las actividades. Las influencias pueden ser temperatura, humedad, polvo, suministro eléctrico, contaminación bacteriana, vibración, entre otros.

Se debe realizar seguimiento, controlar y guardar registros de las condiciones ambientales de acuerdo con las especificaciones de los equipos, métodos y procedimientos, así como el control de acceso y uso de las áreas que afecten las actividades.

4.6.6. Equipo

El laboratorio debe contar con los instrumentos de medición, software, patrones de medición, materiales de referencia, datos de referencia, reactivos, consumibles, etc. Que se requiere para el desarrollo de las actividades.

Se debe contar con procedimiento para la manipulación, operación, transporte, almacenamiento, uso y mantenimiento de los equipos para asegurar un funcionamiento adecuado. El equipo debe tener la exactitud requerida para un resultado válido.

El equipo debe estar debidamente calibrado y se debe contar con un programa de calibración, y se debe revisar y ajustar según sea necesario. Cuando sea necesario se debe realizar comprobaciones intermedias para mantener la confianza en el desempeño del equipo.

4.6.7. Trazabilidad metrológica

El laboratorio debe asegurarse que los resultados de las mediciones sean trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI). Debe establecer y mantener la trazabilidad metrológica de los resultados de sus mediciones por medio de una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, contribuyendo cada una a la incertidumbre de la medición.

4.6.8. Selección, verificación y validación de métodos

El laboratorio debe usar métodos y procedimientos apropiados para todas las actividades, la evaluación de la incertidumbre, así como las técnicas estadísticas para el análisis de datos. Cuando el cliente no especifica el método requerido, el laboratorio debe seleccionar un método apropiado e informar al cliente acerca del método elegido. Se recomiendan los métodos publicados en normas internacionales, regionales o nacionales.

También se puede utilizar métodos desarrollados por el laboratorio o modificarlos. Se debe validar los métodos no normalizados, la validación debe ser de tal manera que satisfaga las necesidades de la aplicación. Las comparaciones inter-laboratorio es una de las técnicas utilizadas para validar los métodos.

4.6.9. Evaluación de la incertidumbre

El laboratorio debe identificar las contribuciones a la incertidumbre de la medición, tomando en cuenta todas las contribuciones significativas utilizando los métodos apropiados de análisis. Cuando el laboratorio realiza las

calibraciones de sus propios equipos debe evaluar la incertidumbre de medición para todas las calibraciones.

4.6.10. Registros técnicos

Se debe asegurar que los registros técnicos para cada actividad contengan los resultados, el informe y la información suficiente para facilitar la identificación de los factores que afectan al resultado de la medición y su incertidumbre asociada. Deben incluir la fecha, personal responsable, comprobar los datos y los resultados. Las observaciones, datos y cálculos se deben registrar en el momento en que se hacen e identificarse con la tarea específica.

4.6.11. Control de documentos y registros

Se debe llevar un control de documentos tanto internos como externos, indicando su aprobación por personal autorizado, deben ser revisados periódicamente y actualizarse según sea necesario. Se debe identificar los cambios y el estado de la revisión actual. Los documentos deben estar identificados inequívocamente y estar disponibles en los puntos de uso para el personal que lo requiera.

Se debe conservar registros para demostrar el cumplimiento de los requisitos de la norma. Se debe implementar controles para la identificación, almacenamiento, protección, copia de seguridad, archivo, recuperación, tiempo de conservación y disposición de los registros.

4.6.12. Auditorías internas

Las auditorías internas se deben llevar a cabo para obtener información acerca de si el sistema de gestión es conforme a los requisitos del propio laboratorio y los requisitos de la norma, así como determinar el grado de implementación y la eficacia.

Se debe establecer y planificar un programa de auditorías que incluya la frecuencia, métodos, responsables, requisitos de planificación y presentación de informes. Se debe definir los criterios y el alcance de la auditoría, así como implementar las acciones correctivas apropiadas.

4.6.13. Revisión por la dirección

La dirección del laboratorio debe revisar su sistema de gestión en intervalos planificados con el fin de asegurar su conveniencia, adecuación y eficacia, incluyendo las políticas y objetivos establecidos relacionados con el cumplimiento de la norma.

Adicional se debe incluir información relacionada con resultado de auditorías recientes, acciones correctivas, evaluaciones de organismos externos, cambios en volumen de trabajo, retroalimentación de los clientes y personal, quejas, identificación de riesgos, capacitación y formación.

5. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA EXACTITUD DE MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En este capítulo se realiza el análisis del efecto de las corrientes armónicas en la exactitud de los medidores, realizando pruebas en condiciones de laboratorio, utilizando un equipo de calibración automática y metodología basado en las normas ANSI.

5.1. Sistema automático de calibración RS-933

El sistema automático de calibración RS-933 está diseñado para calibrar una amplia gama de equipos de prueba. Provee la exactitud y diversas funcionalidades requeridas hoy en día por laboratorios de metrología. Ofrece óptima eficiencia en las pruebas, operación simple, estandarización de pruebas que permite exactitudes muy altas y linealidad en todo el rango de operación.

Las capacidades de prueba incluyen: Patrones de energía, multímetros digitales, medidores de fase, medidores de energía, medidores de potencia, amperímetros, paneles de medidores y medidores de calidad de potencia.

5.1.1. Características del Sistema automático de calibración RS-933

- Exactitud de 0,005 % en watt-hora (50 ppm), con trazabilidad hasta el NIST.

- Salida de corriente de 1 mA a 200 A en cada una de las salidas, lo que permite evitar la reconfiguración de cables para diferentes pruebas y se reduce el tiempo.
- Capacidad de crear formas de onda definidas por el usuario. Armónicos de corriente y tensión relativas a la fundamental.
- Pruebas automáticas para hasta 16 dispositivos a la vez.
- Más de 60 parámetros de medición incluyendo VAR-hora.
- Flexibilidad para simple o múltiples fases con control de armónicos independientes.
- Interface con protocolos de comunicación TCP/IP que permite acceso desde cualquier para control o acceso a información.

En la figura 47 se muestra el sistema automático de calibración RS-933.

Figura 47. **Sistema automático de calibración Radian RS-933**



Fuente: Laboratorio Metric.

5.1.2. Parámetros de medición

Con este sistema automático de calibración es posible realizar mediciones de múltiples variables ya sea valores acumulados como valores instantáneos.

Los valores de medición acumulados incluyen:

- Wh neto
- Wh entregado
- Wh recibido
- VARh neto
- VARh entregado
- VARh recibido
- Qh
- VAh RMS
- VAh promedio
- Vh RMS
- Vh promedio
- Ah RMS
- Ah promedio

Los valores de medición instantáneos incluyen:

- W
- VAr
- VAr RMS
- VA RMS
- VA Promedio

- V RMS
- V promedio
- A RMS
- A promedio
- Angulo de fase
- Factor de potencia
- Frecuencia
- Tiempo

5.1.3. Exactitud

La exactitud del sistema automático de calibración RS-933 es $\pm 0.005\%$ trazable al NIST con forma de onda senoidal. Esta especificación de exactitud se indica como un porcentaje de la lectura y aplica en todo el rango de operación de corriente y tensión.

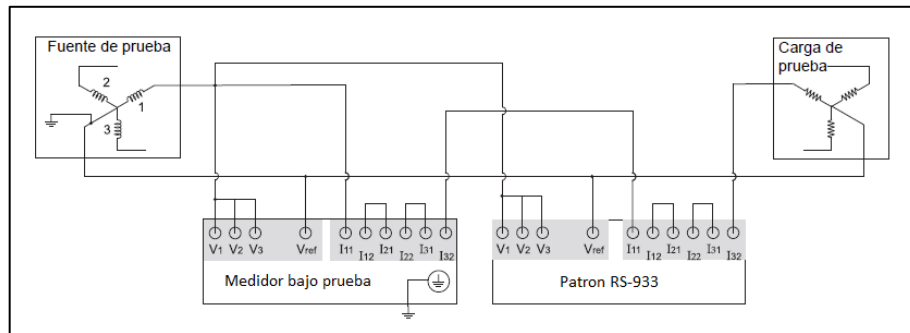
5.1.4. Certificado de calibración

El equipo a utilizar RS-933 se encuentra identificado con el número de serie 704235/933071, cuenta con un certificado de calibración vigente identificado como LC-053-18 con fecha 23/08/2018 emitido por el Laboratorio de Calibración Metric, donde se comprueba que dicho equipo cumple con las especificaciones de exactitud, según procedimiento basado en la norma NTG/ISO/IEC 17025:2015 y ANSI/NCSL Z540-1.

5.1.5. Diagrama de conexiones

En la figura 48 se muestra el diagrama de conexiones para realizar las pruebas de verificación.

Figura 48. Diagrama de conexión medidor



Fuente: Schneider Electric. Verificación de la precisión de los medidores Power Logic.

5.2. Condiciones de laboratorio

El laboratorio donde se realizarán las pruebas tiene acreditación bajo la norma NTG/ISO/IEC 17025:2015 vigente desde noviembre 2016 identificado con el código OGA-LC-062 y dentro de su alcance incluye medidores de energía eléctrica y patrones de energía eléctrica, además de transformadores de instrumento.

Posee un ambiente exclusivo para los trabajos de calibración de patrones, con acceso restringido a personal que cumple con las competencias técnicas y competencias de seguridad.

Está equipado con protecciones eléctricas para transitorios de corriente y tensión, con UPS de 6 kVa trifásico para proteger de cortes de energía y sobre tensiones, así como proveer continuidad a las pruebas.

El ambiente está equipado con dos equipos de aire acondicionado independientes para cada uno de los ambientes para asegurar las condiciones de temperatura y humedad.

El acceso restringido permite además mantener el ambiente libre de polvo, partículas, ruido, vibraciones y contaminación lumínica que puedan afectar el desarrollo de las pruebas.

El laboratorio cuenta además con una red de tierra física exclusiva e independiente de la tierra física de las instalaciones eléctricas del edificio.

5.2.1. Monitor de temperatura y humedad

Las condiciones de temperatura y humedad son monitoreadas por un termohigrómetro, por medio de él se obtienen las lecturas instantáneas de temperatura y humedad, este instrumento es un modelo HMT331 con número de serie L2940217 con certificado de calibración vigente número 20181024-39-1 emitido por Laboratorio SCM el cual cumple con acreditación ISO/IEC 17025:2015.

Los registros de temperatura y humedad son almacenados cada quince minutos y son monitoreados en línea para asegurar que en todo momento el ambiente se encuentre dentro de los parámetros que la norma y el sistema de Gestión de Calidad exigen.

5.2.2. Equipo de protección personal

Para realizar las pruebas es necesario utilizar equipo de protección personal que incluye guantes de cuero, bata anti estática, lentes de protección y botas anti deslizantes.

5.3. Metodología

La metodología a utilizar para realizar las pruebas está basada en las normas ANSI C12.20:2015. Se seleccionarán varios medidores que corresponden a los modelos de medidor más utilizados actualmente para la medición comercial en distribuidoras y en el mercado no regulado para grandes usuarios. Los medidores seleccionados son de estado sólido clase 20, trifásicos, forma 9S, con clase de exactitud 0,2 %.

Se efectuarán las pruebas de desempeño de carga según la pruebas número 3 de la norma ANSI C12.20:2015 con ondas de corriente y tensión senoidal pura. Posteriormente se realizarán las pruebas número 39, 40, 41, 42, 43 y 44 de la norma ANSI C12.20:2015 las cuales incluyen diferentes formas de distorsión armónica en las señales de corriente y tensión.

Los resultados de las pruebas serán tabulados y graficados y a continuación se realizará el análisis del efecto producido en la exactitud de cada medidor por la influencia de las señales armónicas.

5.4. Procedimiento de prueba

Para la realización de las diferentes pruebas para cada medidor deben seguirse los pasos indicados a continuación:

- Utilizar el equipo de protección personal y verificar la ruta de evacuación en caso de presentarse alguna emergencia.
- Asegurarse que el equipo RS-933 se encuentre apagado y que todos los accesorios y cables estén conectados.
- Colocar el medidor bajo prueba (IBC) en el soporte de prueba, asegurando que las clavijas del medidor se aseguren firmemente en las mordazas del medidor.
- Conectar el terminal de tierra del medidor a la barra de tierra física.
- Conectar los cables de salida de corriente y tensión del equipo RS-933 a los terminales del soporte de prueba, verificando previamente con un voltímetro que no exista tensión.
- Encender el equipo patrón RS-933 y esperar 10 minutos para su estabilización.
- Encender la PC e iniciar el software de control RS-933.
- Seleccionar la configuración de instrumento bajo calibración (IBC), seleccionar el tipo de patrón a utilizar.
- Seleccionar una plantilla de prueba adecuada.
- Colocar el medidor en modo prueba.
- Conectar el sensor infrarrojo a la salida de pulsos del medidor bajo prueba.
- Realizar la prueba de calentamiento al medidor suministrando tensión y corriente de placa por 15 minutos.
- Alinear el sensor óptico asegurándose que se registran los pulsos de salida.
- Verificar que los valores de temperatura y humedad se encuentran dentro del rango especificado en la norma.
- En el software de control del RS-933 iniciar la prueba en la plantilla seleccionada, la batería de pruebas iniciará en forma automática y los resultados se irán mostrando en la pantalla.

- Conforme se realiza la prueba debe verificarse las condiciones de temperatura y humedad y que las condiciones de la prueba se mantengan según la secuencia indicada en la plantilla.
- Al terminar la secuencia de pruebas los datos se grabarán automáticamente en un archivo electrónico.

5.5. Configuración de parámetros de prueba

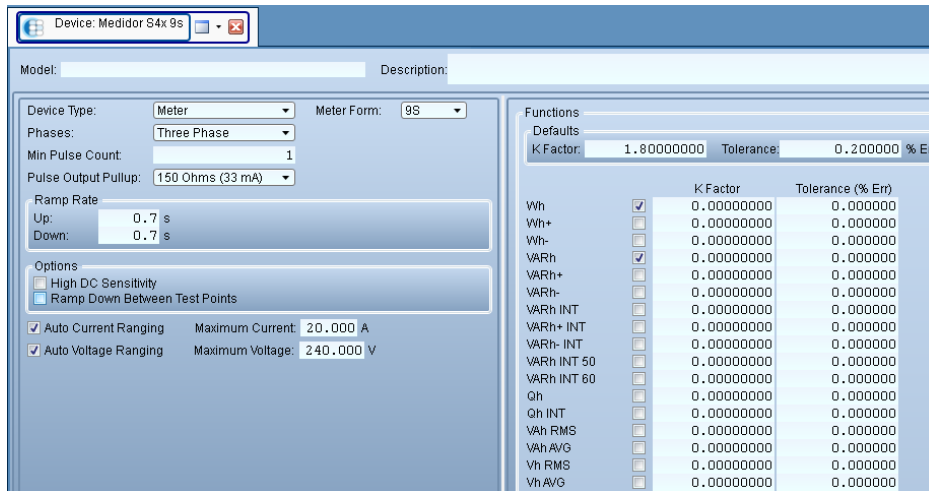
En el software de control del sistema automático de calibración RS-933 se debe establecer los parámetros del instrumento a calibrar, las condiciones de prueba se pueden agrupar por medio de una plantilla y crear una secuencia de pruebas ininterrumpidas.

La aplicación permite editar y modificar diferentes formas de onda tanto de corriente como de tensión, editando los valores de componentes armónicos en magnitud y fase respecto a la fundamental.

5.5.1. Definición del instrumento bajo calibración

Para cada medidor se debe crear un registro donde se configuran los valores de la placa de datos del instrumento bajo calibración (IBC), que incluye modelo del medidor, número de serie, corriente máxima, tensión de prueba, constante de prueba K_t , forma del medidor, cantidad de fases, clase de exactitud y las magnitudes de medición.

Figura 49. Configuración de instrumento bajo calibración



Fuente: Laboratorio Metric.

5.5.2. Definición de formas de onda

Las formas de onda se pueden editar de acuerdo a la necesidad o requerimiento de la prueba deseada. El software trae definidas formas de onda básicas, pero se pueden crear nuevas o editar existentes conociendo los componentes armónicos tanto en porcentaje de la componente fundamental o valor RMS y ángulo de fase ya sea en grados o radianes.

El valor de distorsión armónica total THD se calcula automáticamente. Una forma de onda puede ser utilizada tanto para la señal de corriente como para la señal de tensión.

Figura 50. Edición de forma de onda

#	Active	Amplitude	Phase
1	<input checked="" type="checkbox"/>	0.94868	0.00000
2	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
3	<input checked="" type="checkbox"/>	0.31623	0.00000
4	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
5	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
6	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
7	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
8	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
9	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
10	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
11	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
12	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
13	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
14	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000
15	<input type="checkbox"/>	0.00000	0.00000

Controls

Normalize To Unity RMS

Normalize To Fundamental

Phase Units

Degrees

Radians

THD: 33.33 %

Fuente: Laboratorio Metric.

5.5.3. Definición de plantillas de prueba

La plantilla de prueba de configura para crear una secuencia de pruebas sobre las cuales se realiza la comparación del instrumento bajo calibración IBC contra el patrón de comparación. Se define los niveles de corriente y tensión, forma de onda, tiempo de duración de la prueba, tiempo de estabilización, ángulo de fase, función a medir, salida de pulso y porcentaje de error. En la figura 51 de muestra la plantilla de prueba definida para la prueba de desempeño de exactitud.

Las plantillas de prueba se pueden almacenar y editar. Se puede utilizar la misma plantilla de prueba para diversos instrumentos.

Figura 51. **Plantilla de pruebas**

		Phase 3		Phase 3		Voltage		
						Phase		
						Average		
Stab Time	Test Time	Current	Volt Wave	Curr Wave	Average	120.000000	120.000000	120.000000
10.000000	125.000000	0.150000	Pure	Pure		0.000000	0.000000	0.000000
10.000000	80.000000	0.250000	Pure	Pure				
10.000000	45.000000	0.500000	Pure	Pure				
10.000000	20.000000	1.500000	Pure	Pure				
10.000000	60.000000	2.500000	Pure	Pure				
10.000000	10.000000	5.000000	Pure	Pure				
10.000000	10.000000	10.000000	Pure	Pure				
10.000000	10.000000	15.000000	Pure	Pure				
10.000000	10.000000	18.000000	Pure	Pure				
10.000000	10.000000	20.000000	Pure	Pure				

Fuente: Laboratorio Metric.

5.6. Medidores a verificar

Para realizar las pruebas se seleccionaron cuatro modelos que son los más utilizados actualmente en la medición de energía eléctrica para fines comerciales tanto por distribuidoras como para el mercado no regulado.

Todos los medidores tienen los mismos datos de placa, así que tienen las mismas características. En la tabla XXXVII se indica las características de placa de los medidores a verificar.

Tabla XXXVII. **Características de medidores a verificar**

Característica	Valor
Fases	3
Forma	9S
Clase de corriente	20
Clase de exactitud	0,2 %
Corriente de prueba	2,5
Tensión	120-480 V
Elementos	3
Hilos	4
Constante de prueba (Kt)	1,8

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXXVIII se indica los números de serie de identificación de cada uno de los medidores a verificar y el año de fabricación.

Tabla XXXVIII. **Números de serie de medidores a verificar**

Medidor de prueba	Núm. serie fabrica	Núm. serie cliente	Año de fabricación
#1	MW-1507A947-02	F-74483	2 015
#2	138297421	F-76318	2 017
#3	142771916	F-78201	2 018
#4	7992845	M-63398	2 013

Fuente: elaboración propia.

5.7. Verificación de medidores de energía

En la figura 52 se muestra la configuración de conexiones de los cables de corriente, cables de tensión y sensor óptico para la realización de las pruebas e verificación. En la figura 53 se muestra un medidor conectado al equipo para la prueba de verificación de exactitud.

Figura 52. **Equipo patrón, cables de conexión, sensor y accesorios**



Fuente: Laboratorio Metric.

Figura 53. **Medidor de energía conectado al equipo patrón**



Fuente: Laboratorio Metric.

5.7.1. Verificación de medidores en laboratorio con onda senoidal pura

En la tabla XXXIX se muestra los puntos de prueba a realizar, según la prueba número 3 de norma ANSI C12.20-2015, y se realizan con onda senoidal pura tanto en la corriente como en la tensión.

Tabla XXXIX. Puntos de prueba para onda senoidal pura

Tiempo de estabilización (s)	Tiempo de prueba (s)	Corriente (A)	Señal de tensión	Señal de corriente
10	125	0.15	Senoidal	Senoidal
10	80	0.25	Senoidal	Senoidal
10	45	0.50	Senoidal	Senoidal
10	20	1.50	Senoidal	Senoidal
10	60	2.50	Senoidal	Senoidal
10	10	5.0	Senoidal	Senoidal
10	10	10	Senoidal	Senoidal
10	10	15	Senoidal	Senoidal
10	10	18	Senoidal	Senoidal
10	10	20	Senoidal	Senoidal

Fuente: elaboración propia.

En la figura 51 se muestra la plantilla de prueba programada en el software del equipo RS-933.

5.7.2. Verificación de medidores en laboratorio con onda distorsionada

En la tabla XL se muestra los puntos de prueba a realizar para el caso de señales de corriente con distorsión armónica según las pruebas No. 39 a No. 44 de la norma ANSI C12.20-2015. En la figura 54 se muestra la plantilla de prueba programada en el software del equipo RS-933.

Tabla XL. **Puntos de prueba para condiciones con distorsión armónica**

Tiempo de estabilización (s)	Tiempo de prueba (s)	Corriente (A)	Señal de Tensión	Señal de corriente
10	60	2,5	Senoidal	Senoidal
10	60	2,5	Senoidal	90° cortada
10	60	2,5	Senoidal	Cuadrada
10	60	2,5	Cuadrada	Cuadrada
10	60	2,5	Senoidal	Pico
10	60	2,5	Pico	Pico
10	60	2,5	Senoidal	Pulso
10	60	2,5	Pulso	Pulso
10	60	2,5	Senoidal	Multiple cero
10	60	2,5	Multiple cero	Senoidal

Fuente: elaboración propia.

Figura 54. **Plantilla de prueba para señales de corriente con distorsión armónica**

Armonicos Medidor 9S				
				Phase 3
Stab Time	Test Time	Current	Volt Wave	Curr Wave
10.000000	25.000000	2.500000	Pure	Pure
10.000000	25.000000	2.500000	Pure	T39 HC 90
10.000000	25.000000	2.500000	Pure	T40 HC Qu
10.000000	25.000000	2.388250	T40 HV Qu	T40 HC Qu
10.000000	25.000000	2.500000	Pure	Test 41 Pe:
10.000000	25.000000	2.388250	Test 41 Pe:	Test 41 Pe:
10.000000	25.000000	2.500000	Pure	T42 HC Pu
10.000000	25.000000	2.074075	T42 HV Pul	T42 HC Pu
10.000000	25.000000	2.500000	Pure	T 43 HC ML
10.000000	25.000000	2.500000	T44 HV Mu	Pure

Fuente: Laboratorio Metric.

5.7.3. Resultados de verificación

Los resultados de las pruebas son guardados automáticamente por el software del equipo RS-933, y el registro se puede exportar a un archivo separado por comas, para ser analizado en una hoja electrónica. Para cada punto de prueba se realizaron tres repeticiones de la misma medición y se toma el promedio de las tres mediciones como el resultado de la misma.

5.7.3.1. Resultados de medidor núm. 1 serie MW-1507A947-02

En la tabla XLI se muestra el resultado de las pruebas de exactitud con onda senoidal para el medidor No.1 con número de serie MW-1507A947-02, el resultado muestra el porcentaje de error del medidor respecto al patrón para los diferentes valores de corriente.

Tabla XLI. Resultados de prueba con onda senoidal para medidor núm. 1

Medidor #1				
No. Serie: MW-1507A947-02				
Tensión : 120V Senoidal		Corriente: Senoidal		
Frecuencia: 60 HZ		Angulo de fase: 0		
Corriente (A)	% error			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
0.15	-0.118	-0.111	-0.110	-0.113
0.25	-0.108	-0.107	-0.100	-0.105
0.5	-0.112	-0.108	-0.114	-0.111
1.5	-0.108	-0.112	-0.112	-0.111
2.5	-0.097	-0.092	-0.096	-0.095
5	-0.102	-0.111	-0.111	-0.108
10	-0.101	-0.111	-0.101	-0.105
15	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111
18	-0.110	-0.119	-0.110	-0.113
20	-0.111	-0.111	-0.120	-0.114

Fuente: Laboratorio Metric.

En la tabla XLII se muestra el resultado de las pruebas de exactitud para onda senoidal con señales armónicas para el medidor núm.1 con número de serie MW-1507A947-02, el resultado muestra el porcentaje del error respecto al patrón para diferentes formas de onda en tensión y corriente.

Tabla XLII. **Resultados de prueba con armónicos para medidor núm. 1**

Medidor #1						
No. Serie: MW-1507A947-02						
Tensión : 120V Senoidal				Corriente: Senoidal		
Frecuencia: 60 HZ				Angulo de fase: 0		
Corriente (A)	Onda de tensión	Onda de corriente	% error			
			Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
2.5	Senoidal	Senoidal	-0.098	-0.095	-0.097	-0.096
2.5	Senoidal	90° cortada	-0.108	-0.108	-0.108	-0.108
2.5	Senoidal	Cuadrada	-0.074	-0.074	-0.076	-0.075
2.5	Cuadrada	Cuadrada	-0.068	-0.069	-0.067	-0.068
2.5	Senoidal	Pico	-0.225	-0.225	-0.225	-0.225
2.5	Pico	Pico	-0.148	-0.150	-0.150	-0.149
2.5	Senoidal	Pulso	-0.443	-0.440	-0.438	-0.440
2.5	Pulso	Pulso	-0.197	-0.195	-0.192	-0.194
2.5	Senoidal	Multiple cero	-0.038	-0.040	-0.044	-0.041
2.5	Multiple cero	Senoidal	-0.100	-0.104	-0.109	-0.104

Fuente: Laboratorio Metric.

5.7.3.2. Resultados de medidor núm. 2 serie 138297421

En la tabla XLIII se muestra el resultado de las pruebas de exactitud con onda senoidal para el medidor núm. 2 con número de serie 138297421, el resultado muestra el porcentaje de error en el medidor respecto al patrón para los diferentes valores de corriente.

Tabla XLIII. **Resultados de prueba con onda senoidal para medidor
núm. 2**

Medidor #2				
No. Serie: 138297421				
Tensión : 120V Senoidal		Corriente: Senoidal		
Frecuencia: 60 HZ		Angulo de fase: 0		
Corriente (A)	% error			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
0.15	-0.046	-0.039	-0.041	-0.042
0.25	-0.049	-0.049	-0.053	-0.050
0.5	-0.073	-0.075	-0.072	-0.073
1.5	-0.086	-0.073	-0.077	-0.079
2.5	-0.079	-0.084	-0.077	-0.080
5	-0.081	-0.071	-0.071	-0.074
10	-0.081	-0.090	-0.081	-0.084
15	-0.081	-0.081	-0.090	-0.084
18	-0.086	-0.076	-0.066	-0.076
20	-0.081	-0.081	-0.081	-0.081

Fuente: Laboratorio Metric.

En la tabla XLIV se muestra el resultado de las pruebas de exactitud para onda senoidal con señales armónicas para el medidor núm. 2 con número de serie 138297421, el resultado muestra el porcentaje del error respecto al patrón para diferentes formas de onda en tensión y corriente.

Tabla XLIV. **Resultados de prueba con armónicos para medidor núm. 2**

Medidor #2						
No. Serie: 138297421						
Tensión : 120V Senoidal				Corriente: Senoidal		
Frecuencia: 60 HZ				Angulo de fase: 0		
Corriente (A)	Onda de tensión	Onda de corriente	% error			
			Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
2.5	Senoidal	Senoidal	-0.089	-0.089	-0.089	-0.089
2.5	Senoidal	90° cortada	-0.049	-0.070	-0.067	-0.062
2.5	Senoidal	Cuadrada	-0.090	-0.090	-0.084	-0.088
2.5	Cuadrada	Cuadrada	-0.078	-0.081	-0.080	-0.080
2.5	Senoidal	Pico	-0.146	-0.153	-0.143	-0.147
2.5	Pico	Pico	-0.077	-0.128	-0.122	-0.109
2.5	Senoidal	Pulso	-0.142	-0.234	-0.229	-0.202
2.5	Pulso	Pulso	-0.125	-0.135	-0.135	-0.131
2.5	Senoidal	Múltiple cero	-0.074	-0.078	-0.075	-0.076
2.5	Múltiple cero	Senoidal	-0.082	-0.086	-0.092	-0.087

Fuente: Laboratorio Metric.

5.7.3.3. Resultados de medidor núm. 3 serie 142771916

En la tabla XLV se muestra el resultado de las pruebas de exactitud con onda senoidal para el medidor núm. 3 con número de serie 142771916, el resultado muestra el porcentaje de error en el medidor respecto al patrón para los diferentes valores de corriente.

Tabla XLV. **Resultados de prueba con onda senoidal para medidor
número 3**

Medidor #3				
No. Serie: 142771916				
Tensión : 120V Senoidal		Corriente: Senoidal		
Frecuencia: 60 HZ		Angulo de fase: 0		
Corriente (A)	% error			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
0.15	-0.090	-0.094	-0.088	-0.091
0.25	-0.076	-0.091	-0.085	-0.084
0.5	-0.078	-0.078	-0.071	-0.075
1.5	-0.075	-0.068	-0.068	-0.070
2.5	-0.066	-0.069	-0.066	-0.067
5	-0.051	-0.062	-0.077	-0.063
10	-0.081	-0.088	-0.073	-0.081
15	-0.058	-0.055	-0.070	-0.061
18	-0.085	-0.073	-0.045	-0.068
20	-0.055	-0.077	-0.081	-0.071

Fuente: Laboratorio Metric.

En la tabla XLVI se muestra el resultado de las pruebas de exactitud para onda senoidal con señales armónicas para el medidor No.3 con número de serie 142771916, el resultado muestra el porcentaje del error respecto al patrón para diferentes formas de onda en tensión y corriente.

Tabla XLVI. **Resultados de prueba con armónicos para medidor núm. 3**

Medidor #3						
No. Serie: 142771916						
Tensión : 120V Senoidal				Corriente: Senoidal		
Frecuencia: 60 HZ				Angulo de fase: 0		
Corriente (A)	Onda de tensión	Onda de corriente	% error			
			Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
2.5	Senoidal	Senoidal	-0.099	-0.088	-0.076	-0.088
2.5	Senoidal	90° cortada	-0.051	-0.049	-0.046	-0.049
2.5	Senoidal	Cuadrada	-0.066	-0.078	-0.074	-0.073
2.5	Cuadrada	Cuadrada	-0.070	-0.071	-0.080	-0.073
2.5	Senoidal	Pico	-0.115	-0.116	-0.113	-0.115
2.5	Pico	Pico	-0.085	-0.094	-0.088	-0.089
2.5	Senoidal	Pulso	-0.176	-0.175	-0.181	-0.177
2.5	Pulso	Pulso	-0.097	-0.106	-0.098	-0.100
2.5	Senoidal	Multiple cero	-0.067	-0.065	-0.066	-0.066
2.5	Multiple cero	Senoidal	-0.081	-0.078	-0.073	-0.077

Fuente: Laboratorio Metric.

5.7.3.4. **Resultados de medidor núm. 4 serie 7992845**

En la tabla LXVII se muestra el resultado de las pruebas de exactitud con onda senoidal para el medidor No.4 con número de serie 7992845, el resultado muestra el porcentaje de error en el medidor respecto al patrón para los diferentes valores de corriente.

Tabla XLVII. **Resultados de prueba con onda senoidal para medidor
núm. 4**

Medidor #4				
No. Serie: 7992845				
Tensión : 120V Senoidal		Corriente: Senoidal		
Frecuencia: 60 HZ		Angulo de fase: 0		
Corriente (A)	% error			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
0.15	-0.088	-0.093	-0.099	-0.094
0.25	-0.098	-0.100	-0.103	-0.101
0.5	-0.101	-0.102	-0.103	-0.102
1.5	-0.103	-0.105	-0.103	-0.104
2.5	-0.091	-0.092	-0.092	-0.092
5	-0.115	-0.114	-0.114	-0.114
10	-0.123	-0.124	-0.126	-0.124
15	-0.128	-0.129	-0.128	-0.128
18	-0.130	-0.130	-0.130	-0.130
20	-0.131	-0.133	-0.130	-0.131

Fuente: Laboratorio Metric.

En la tabla XLVI se muestra el resultado de las pruebas de exactitud para onda senoidal con señales armónicas para el medidor núm. 4 con número de serie 7992845, el resultado muestra el porcentaje del error respecto al patrón para diferentes formas de onda en tensión y corriente.

Tabla XLVIII. **Resultados de prueba con armónicos para medidor
núm. 4**

Medidor #4						
No. Serie: 7992845						
Tensión : 120V Senoidal				Corriente: Senoidal		
Frecuencia: 60 HZ				Angulo de fase: 0		
Corriente (A)	Onda de tensión	Onda de corriente	% error			
			Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
2.5	Senoidal	Senoidal	-0.093	-0.094	-0.096	-0.094
2.5	Senoidal	90° cortada	-0.070	-0.070	-0.070	-0.070
2.5	Senoidal	Cuadrada	-0.099	-0.100	-0.100	-0.099
2.5	Cuadrada	Cuadrada	-0.090	-0.090	-0.091	-0.090
2.5	Senoidal	Pico	-0.125	-0.126	-0.126	-0.126
2.5	Pico	Pico	-0.107	-0.107	-0.107	-0.107
2.5	Senoidal	Pulso	-0.162	-0.162	-0.162	-0.162
2.5	Pulso	Pulso	-0.088	-0.088	-0.088	-0.088
2.5	Senoidal	Múltiple cero	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113
2.5	Múltiple cero	Senoidal	-0.109	-0.108	-0.109	-0.109

Fuente: Laboratorio Metric.

5.8. Análisis de resultados de verificación de medidores

Los resultados obtenidos para las pruebas de cada uno de los medidores se comparan con los límites establecidos en las tablas XVII, XX, XXII, XXIV, XXVI, XXVIII Y XXX para confirmar si cumplen con lo especificado en la norma ANSI C12.20:2015.

En la tabla XLIX se muestra los resultados del medidor No.1, en todos los puntos de prueba el medidor cumple los requisitos de exactitud; el error más pequeño respecto al patrón se presenta en la corriente de referencia 2.5 A. El error más grande se presenta en la corriente más grande 20A, sin embargo la variación entre los errores para los diferentes niveles de corriente es relativamente pequeña, lo que demuestra que este medidor además de cumplir

con los requisitos de exactitud presenta una buena precisión respecto de las variaciones de corriente en todo el rango de operación.

Esto permite asegurar que sin importar la cantidad de carga que tenga el medidor el error va ser muy similar y estable.

Tabla XLIX. **Evaluación del medidor núm. 1 desempeño de carga**

Medidor #1							
No. Serie: MW-1507							
Tensión (V)	Corriente (A)	Factor de Potencia	Error	Exactitud	Error desde referencia	Limites	Evaluación
120	0.15	1.0	-0.113	99.887	0.018	±0.4	Conforme
120	0.25	1.0	-0.105	99.895	0.010	±0.2	Conforme
120	0.5	1.0	-0.111	99.889	-0.016	±0.2	Conforme
120	1.5	1.0	-0.111	99.889	-0.016	±0.2	Conforme
120	2.5	1.0	-0.095	99.905	Referencia	Referencia	Conforme
120	5	1.0	-0.108	99.892	-0.108	±0.2	Conforme
120	10	1.0	-0.105	99.895	-0.105	±0.2	Conforme
120	15	1.0	-0.111	99.889	-0.111	±0.2	Conforme
120	18	1.0	-0.113	99.887	-0.113	±0.2	Conforme
120	20	1.0	-0.114	99.886	-0.114	±0.2	Conforme

Fuente: Laboratorio Metric.

En la tabla L se muestra los resultados del medidor núm. 2, en todos los puntos de prueba el medidor cumple los requisitos de exactitud; el error más pequeño respecto al patrón se presenta en la corriente mínima 0,15 A. El error más grande se presenta en 10 y 15A. Este medidor presenta la característica que el error va aumentando conforme aumente la corriente de carga, es decir es más exacto para valores de corriente más bajos.

Tabla L. **Evaluación del medidor núm. 2 desempeño de carga**

Medidor #2							
No. Serie: 13829742:							
Tensión (V)	Corriente (A)	Factor de Potencia	Error	Exactitud	Error desde referencia	Limites	Evaluación
120	0.15	1.0	-0.042	99.958	-0.038	±0.4	Conforme
120	0.25	1.0	-0.050	99.950	-0.030	±0.2	Conforme
120	0.5	1.0	-0.073	99.927	0.007	±0.2	Conforme
120	1.5	1.0	-0.079	99.921	0.001	±0.2	Conforme
120	2.5	1.0	-0.080	99.920	Referencia	Referencia	Conforme
120	5	1.0	-0.074	99.926	-0.074	±0.2	Conforme
120	10	1.0	-0.084	99.916	-0.084	±0.2	Conforme
120	15	1.0	-0.084	99.916	-0.084	±0.2	Conforme
120	18	1.0	-0.076	99.924	-0.076	±0.2	Conforme
120	20	1.0	-0.081	99.919	-0.081	±0.2	Conforme

Fuente: Laboratorio Metric.

En la tabla LI se muestra los resultados del medidor núm. 3, en todos los puntos de prueba el medidor cumple los requisitos de exactitud; el error más pequeño respecto al patrón se presenta en 15 A. El error más grande se presenta en la corriente más pequeña 0,15 A. Este medidor es el que presenta la menor variación en los resultados del error respecto a la prueba de referencia, es decir que el resultado de la exactitud en la prueba de referencia es bastante representativo para todos los demás puntos de prueba del rango de operación del medidor.

Tabla LI. **Evaluación del medidor núm. 3 desempeño de carga**

Medidor #3							
No. Serie: 14277191							
Tensión (V)	Corriente (A)	Factor de Potencia	Error	Exactitud	Error desde referencia	Limites	Evaluación
120	0.15	1.0	-0.091	99.909	0.024	±0.4	Conforme
120	0.25	1.0	-0.084	99.916	0.017	±0.2	Conforme
120	0.5	1.0	-0.075	99.925	-0.008	±0.2	Conforme
120	1.5	1.0	-0.070	99.930	-0.003	±0.2	Conforme
120	2.5	1.0	-0.067	99.933	Referencia	Referencia	Conforme
120	5	1.0	-0.063	99.937	-0.063	±0.2	Conforme
120	10	1.0	-0.081	99.920	-0.081	±0.2	Conforme
120	15	1.0	-0.061	99.939	-0.061	±0.2	Conforme
120	18	1.0	-0.068	99.932	-0.068	±0.2	Conforme
120	20	1.0	-0.071	99.929	-0.071	±0.2	Conforme

Fuente: Laboratorio Metric.

En la tabla LII se muestra los resultados del medidor núm. 4, en todos los puntos de prueba el medidor cumple los requisitos de exactitud; el error más pequeño respecto al patrón se presenta en la corriente de referencia 2,5 A. El error más grande se presenta en la corriente más grande 20 A, muy similar al comportamiento del medidor núm. 1. Este es el medidor que presenta el error más grande de los cuatro, y también presenta la característica de mejor exactitud con corrientes bajas y aumenta el error conforme la corriente se acerca a la corriente máxima del rango de operación.

Tabla LII. Evaluación del medidor núm. 4 desempeño de carga

Medidor #4							
No. Serie: 7992845							
Tensión (V)	Corriente (A)	Factor de Potencia	Error	Exactitud	Error desde referencia	Limites	Evaluación
120	0.15	1.0	-0.094	99.906	0.002	±0.4	Conforme
120	0.25	1.0	-0.101	99.899	0.009	±0.2	Conforme
120	0.5	1.0	-0.102	99.898	-0.010	±0.2	Conforme
120	1.5	1.0	-0.104	99.896	-0.012	±0.2	Conforme
120	2.5	1.0	-0.092	99.908	Referencia	Referencia	Conforme
120	5	1.0	-0.114	99.886	-0.114	±0.2	Conforme
120	10	1.0	-0.124	99.876	-0.124	±0.2	Conforme
120	15	1.0	-0.128	99.872	-0.128	±0.2	Conforme
120	18	1.0	-0.130	99.870	-0.130	±0.2	Conforme
120	20	1.0	-0.131	99.869	-0.131	±0.2	Conforme

Fuente: Laboratorio Metric.

Según los resultados obtenidos para las pruebas de exactitud con diferentes corrientes y señales de onda senoidales se observa que los cuatro medidores cumplen con los requisitos de exactitud según la prueba núm. 3 de la norma ANSI C12.20:2015. Para el caso de los medidores de prueba núm. 1 y núm. 4 cumplen a pesar que el año de fabricación es anterior a la publicación de la norma.

En la tabla LIII se muestra la evaluación para el medidor núm. 1 en condiciones de distorsión armónica. En todas las condiciones de prueba el medidor cumple con lo especificado en la norma. En la prueba de referencia con señal senoidal el error es de -0,096. El error más pequeño se presenta en la prueba de múltiple cruce de cero en la corriente con error de -0,041, el error más grande se presenta en la prueba de onda tipo pulso en la corriente con -0,440 y es el punto de prueba que está más próximo a salir del límite con un valor de -0,291 respecto al desempeño de referencia.

Se observa que en las formas de onda tipo pico y tipo pulso es donde presenta los errores más grandes, mientras que en las pruebas con onda cuadrada es donde presenta el error más cercano a la prueba de referencia.

Tabla LIII. **Evaluación de medidor núm. 1 desempeño con armónicos**

Medidor #1						
No. Serie: MW-1507A947-02						
Tensión : 120 V						
Corriente: 2.5 A						
Factor de potencia : 1.0						
Onda de tensión	Onda de corriente	Error	Exactitud	Error desde referencia	Limites	Evaluación
Senoidal	Senoidal	-0.096	99.904	Referencia	Referencia	Conforme
Senoidal	90° cortada	-0.108	99.892	-0.012	±0.3	Conforme
Senoidal	Cuadrada	-0.075	99.925	0.033	±0.3	Conforme
Cuadrada	Cuadrada	-0.068	99.932	0.007	±0.5	Conforme
Senoidal	Pico	-0.225	99.775	-0.157	±0.3	Conforme
Pico	Pico	-0.149	99.851	0.076	±0.5	Conforme
Senoidal	Pulso	-0.440	99.560	-0.291	±0.3	Conforme
Pulso	Pulso	-0.194	99.806	0.246	±0.5	Conforme
Senoidal	Multiple cero	-0.041	99.959	0.154	±0.3	Conforme
Multiple cero	Senoidal	-0.104	99.896	-0.064	±0.3	Conforme

Fuente: Laboratorio Metric.

En la tabla LIV se muestra la evaluación para el medidor núm. 2 en condiciones de distorsión armónica. En todas las condiciones de prueba el medidor cumple con lo especificado en la norma. En la prueba de referencia con señal senoidal el error es de -0,089. El error más pequeño se presenta en la prueba de onda 90° cortada de corriente con error de -0,062, el error más grande se presenta en la prueba de onda tipo pulso en la corriente con -0,202. En las pruebas con onda tipo pico y tipo pulso es donde se presenta los errores más grandes para este medidor.

Tabla LIV. **Evaluación del medidor núm. 2 desempeño con armónicos**

Medidor #2						
No. Serie: 138297421						
Tensión : 120 V						
Corriente: 2.5 A						
Factor de potencia : 1.0						
Onda de tensión	Onda de corriente	Error	Exactitud	Error desde referencia	Limites	Evaluación
Senoidal	Senoidal	-0.089	99.911	Referencia	Referencia	Conforme
Senoidal	90° cortada	-0.062	99.938	0.027	±0.3	Conforme
Senoidal	Cuadrada	-0.088	99.912	-0.026	±0.3	Conforme
Cuadrada	Cuadrada	-0.080	99.920	0.009	±0.5	Conforme
Senoidal	Pico	-0.147	99.853	-0.068	±0.3	Conforme
Pico	Pico	-0.109	99.891	0.038	±0.5	Conforme
Senoidal	Pulso	-0.202	99.798	-0.093	±0.3	Conforme
Pulso	Pulso	-0.131	99.869	0.070	±0.5	Conforme
Senoidal	Multiple cero	-0.076	99.924	0.056	±0.3	Conforme
Multiple cero	Senoidal	-0.087	99.913	-0.011	±0.3	Conforme

Fuente: Laboratorio Metric.

En la tabla LV se muestra la evaluación para el medidor núm. 3 en condiciones de distorsión armónica. En todas las condiciones de prueba el medidor cumple con lo especificado en la norma. En la prueba de referencia con señal senoidal el error es de -0,088. El error más pequeño se presenta en la prueba onda cortada 90° en corriente con error de -0,062, el error más grande se presenta en la prueba de onda tipo pulso en la corriente con -0,202.

Para el medidor núm. 3 los valores de error más grande se presentan también en las formas de onda tipo pico y tipo pulso, sin embargo, este medidor es el que mejores características presenta en cuanto a la desviación desde la prueba de referencia, es decir que en promedio es el que tiene mejor respuesta en exactitud para las diferentes formas de distorsión armónica que se realizaron.

Tabla LV. **Evaluación del medidor núm. 3 desempeño con armónicos**

Medidor #3						
No. Serie: 142771916						
Tensión : 120 V						
Corriente: 2.5 A						
Factor de potencia : 1.0						
Onda de tensión	Onda de corriente	Error	Exactitud	Error desde referencia	Limites	Evaluación
Senoidal	Senoidal	-0.088	99.912	Referencia	Referencia	Conforme
Senoidal	90° cortada	-0.049	99.951	0.039	±0.3	Conforme
Senoidal	Cuadrada	-0.073	99.927	-0.024	±0.3	Conforme
Cuadrada	Cuadrada	-0.073	99.927	-0.001	±0.5	Conforme
Senoidal	Pico	-0.115	99.885	-0.042	±0.3	Conforme
Pico	Pico	-0.089	99.911	0.026	±0.5	Conforme
Senoidal	Pulso	-0.177	99.823	-0.088	±0.3	Conforme
Pulso	Pulso	-0.100	99.900	0.077	±0.5	Conforme
Senoidal	Múltiple cero	-0.066	99.934	0.034	±0.3	Conforme
Múltiple cero	Senoidal	-0.077	99.923	-0.011	±0.3	Conforme

Fuente: Laboratorio Metric.

En la tabla LVI se muestra la evaluación para el medidor núm. 4 en condiciones de distorsión armónica. En todas las condiciones de prueba el medidor cumple con lo especificado en la norma. En la prueba de referencia con señal senoidal el error es de -0,094. El error más pequeño se presenta en la prueba de onda 90° cortada en la corriente con error de -0,094, el error más grande se presenta en la prueba de onda tipo pulso en la corriente con -0,162.

De la misma forma en las pruebas de onda tipo pico y tipo pulso es donde presenta los errores más grandes, sin embargo, respecto a los otros tres medidores este es el que presenta el menor error en esas dos formas de onda y es el que presenta la menor diferencia entre el error máximo y el error mínimo del listado de pruebas, por tanto es el que se comporta con una exactitud más estable para las diferentes tipos de forma de onda.

Tabla LVI. **Evaluación del medidor núm. 4 desempeño con armónicos**

Medidor #4						
No. Serie: 7992845						
Tensión : 120 V						
Corriente: 2.5 A						
Factor de potencia : 1.0						
Onda de tensión	Onda de corriente	Error	Exactitud	Error desde referencia	Limites	Evaluación
Senoidal	Senoidal	-0.094	99.906	Referencia	Referencia	Conforme
Senoidal	90° cortada	-0.070	99.930	0.024	±0.3	Conforme
Senoidal	Cuadrada	-0.099	99.901	-0.029	±0.3	Conforme
Cuadrada	Cuadrada	-0.090	99.910	0.009	±0.5	Conforme
Senoidal	Pico	-0.126	99.874	-0.035	±0.3	Conforme
Pico	Pico	-0.107	99.893	0.018	±0.5	Conforme
Senoidal	Pulso	-0.162	99.838	-0.055	±0.3	Conforme
Pulso	Pulso	-0.088	99.912	0.074	±0.5	Conforme
Senoidal	Multiple cero	-0.113	99.887	-0.025	±0.3	Conforme
Multiple cero	Senoidal	-0.109	99.891	0.004	±0.3	Conforme

Fuente: Laboratorio Metric.

5.9. **Análisis del efecto de la distorsión armónica en medidores de energía eléctrica**

Del análisis efectuado con los resultados de las pruebas para cada uno de los medidores se observa que con las pruebas con formas de onda tipo pico y tipo pulso en la corriente de carga es donde el error resulta más grande para todos los medidores que se probaron. El error más pequeño se presenta para la prueba con onda 90° cortada en la corriente.

Todos los medidores cumplen con los requisitos de exactitud especificada en la norma ANSI C12.20:2015 para clase 0,2. Sin embargo los comportamientos no son similares en todo el rango de operación a diferentes corrientes, de la misma forma que el comportamiento en cuanto a exactitud no es similar para las diferentes formas de onda.

El desempeño de exactitud que cada medidor presenta a diferentes niveles de corriente dependerá del diseño de cada medidor, y se evidenció en las pruebas que los cuatro medidores no se comportan de la misma forma, pues el medidor que presenta el error más pequeño en un punto de prueba no mantiene esta característica en el resto de los puntos.

Mientras tanto otro medidor presenta en todo el rango de operación características de exactitud más parecidas, por tanto, un desempeño más estable y representativo respecto al desempeño de referencia.

Se puede decir, basado en los resultados anteriores que el hecho que un medidor tenga un error muy pequeño en un punto de operación no garantiza que en el resto de los puntos de operación mantenga esta característica y por el contrario puede que el error sea mayor en otros puntos.

Tener un comportamiento estable y muy parecido en todo el rango de operación, es una característica que se debe valorar, puesto que en la práctica las condiciones de operación bajo carga real son muy variadas, dependerá del tipo de curva de carga que se está midiendo, y aunque esta sea muy constante va tener variaciones instantáneas en cualquier momento.

Por tanto, conociendo el desempeño de exactitud del medidor en diferentes puntos de prueba y que este sea lo más parecido posible en todo el rango de operación resulta en que la medición sea más confiable, pues presentará precisión en todos los niveles.

Adicional es importante que la respuesta en el desempeño de exactitud bajo diferentes formas de onda con armónicos no tenga mucha variación, pero

eso dependerá de las características de componente armónico de la carga que se va medir.

Si se puede conocer las condiciones de componente de distorsión armónico de la instalación eléctrica que se está midiendo, se puede tener una referencia para seleccionar un medidor adecuado y que cumpla los requisitos de exactitud bajo la norma en que fue construido.

En la tabla XXXIV se indican las tolerancias o límites de distorsión armónica individual que permite las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD); al comparar esta con los componentes armónicos de las formas de onda indicadas en las tablas XXI, XXIII, XXV y XXVII se puede observar que es mucho mayor el contenido armónico de las formas de onda de prueba cuadrada y pico respecto de los valores indicados en las NTSD, por tanto, las condiciones de prueba superan el peor de los casos.

Sin embargo, para el caso de la forma de onda pulso, los componentes de contenido armónico en la tercera, quinta y séptima armónica es de 80, 60 y 40 respectivamente, mientras en las NTSD es de 16.6, 12.0 y 8.5 respectivamente, lo que significa que las condiciones de la prueba exceden las condiciones que permite la norma técnica.

Es importante tomar en cuenta entonces, que siempre y cuando no se exceda los valores regulatorios de contenido armónico para la corriente de carga, el error adicional producido en la exactitud de los medidores por efecto de las corrientes armónicas respecto de los valores de referencia no debe ser significativo.

En la figura 39 se muestra las características de forma de onda de corriente de varios dispositivos eléctricos que producen contenidos armónicos. Se observa que variadores de velocidad y rectificadores producen una forma de onda cuadrada, mientras que la carga informática produce formas de onda pulso. Por tanto en instalaciones donde predomina la carga por equipos informáticos se debe poner atención a la forma de onda resultante.

El alumbrado fluorescente produce formas de onda similares a la onda de múltiple cruce de cero como el indicado en la tabla XXVII, sin embargo, cuando se mezcla con otro tipo de cargas que consumen más potencia puede que la resultante sea diferente.

CONCLUSIONES

1. El efecto que produce la distorsión armónica en los medidores de energía eléctrica dependerá de la forma de onda resultante, y del porcentaje de las componentes individuales, tanto en magnitud como en ángulo de fase, pudiendo en algunos casos incrementar el error.
2. Con base a las pruebas realizadas a varios modelos de medidores de energía eléctrica en condiciones de laboratorio con forma de onda distorsionada, se comprueba que cumplen con los requisitos de exactitud que establece la norma ANSI C12.20:2015.
3. La normativa nacional vigente para medidores de energía eléctrica está basada en normas internacionales tanto ANSI como IEC, y en estas se especifica los requisitos que deben cumplir los medidores de energía eléctrica con fines comerciales.
4. Las corrientes armónicas en los sistemas eléctricos es un inconveniente que no puede evitarse, porque es producto del cambio tecnológico y debe tenerse en cuenta en la operación de los sistemas, y tomar acciones para mitigar los efectos y prevenir deterioro y falla en los equipos.
5. Es importante contar con laboratorios de metrología eléctrica competentes para brindar trazabilidad y poder calibrar y verificar los equipos de medición, y los medidores que se utilizan con fines comerciales en las transacciones del mercado eléctrico.

6. Los medidores de energía eléctrica de estado sólido conforme han mejorado en calidad y diseño han permitido la posibilidad de tener mediciones más exactas y confiables, a niveles que anteriormente con los medidores electromecánicos no se podían tener.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar medidores de energía eléctrica para uso comercial y para efectos de facturación al usuario, e instrumentos de medición eléctrica que sean contruidos bajo normas y estándares internacionales, de manera que se pueda realizar verificaciones de estos instrumentos.
2. Para garantizar una medición correcta utilizar equipos de calibración y verificación que tengan trazabilidad al sistema internacional.
3. En los sistemas eléctricos efectuar las mediciones necesarias para detectar las corrientes y tensiones con contenido armónico y luego tomar las acciones pertinentes para mitigar los efectos.
4. Para realizar las verificaciones en sitio de medidores de energía eléctrica en condiciones de servicio utilizar una metodología adecuada, y que el personal técnico que realiza esta labor tenga las competencias y conocimientos metrológicos necesarios para esta labor.
5. Realizar calibraciones o verificaciones a los equipos de medición de energía eléctrica periódicamente para asegurar el correcto funcionamiento de los mismos.
6. En el caso de distribuidoras, como sería muy costoso verificar todos los medidores instalados, utilizar métodos normalizados de muestreo y aceptación, agrupando los medidores con similares características para

tener un resultado que describa el comportamiento de los mismos a lo largo de los años de servicio.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABB. *Alpha plus meter technical manual*. ABB: Edition part number TM42-2182C, 2000. 153 p.
2. Administrador del Mercado Mayorista. *Norma de Coordinación Comercial núm. 14. Habilitación comercial para operar en el mercado mayorista y sistema de medición comercial*. Guatemala: AMM, 2002. 36 p.
3. BAIRD, David C. *Experimentación una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*. 2a ed. Canadá: Prentice Hall, 1998. 204 p.
4. CERVERO, David. *Metrología eléctrica DC y baja frecuencia*. Programa regional de apoyo a la calidad y a la aplicación de medidas sanitarias y fitosanitarias en Centroamérica (PRACAMS), Documento No. C1R3A3-10f, 2014. 93 p.
5. COLOMBET, Christian; LUPIN, Jean-Marc; SCHONEK, Jacques. *Cuaderno técnico No. 152 Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento*. Francia: Schneider Electric, 1999. 30 p.

6. Comisión Guatemalteca de Normas Ministerio de Economía. *Norma técnica guatemalteca COGUANOR NTG/JCGM200:2008 Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. Guatemala: COGUANOR, 2013. 69 p.
7. Comisión Guatemalteca de Normas Ministerio de Economía. *Norma técnica guatemalteca NTG/ISO/IEC 17025:2017 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*. Guatemala: COGUANOR, 2018. 39 p.
8. Edison Electric Institute. *Handbook for electricity metering*. Estados Unidos: EEI, 2006. 584 p.
9. FERRACCI, Philippe. *Cuaderno técnico No. 199 La calidad de la energía eléctrica*. Francia: Schneider Electric, 2001. 39 p.
10. GONZÁLEZ LÓPEZ, Francisco Javier. *Metrología industrial*. Guatemala: Enfocad, 2006. 123 p.
11. GUZMÁN CASTAÑEDA, Marlon Martín. *Medición de flujos armónicos en balastos electrónicos y sus efectos en aplicaciones comerciales e industriales*. Trabajo de graduación de Ing. Eléctrica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 105 p.
12. Landis Gyr. *Manual técnico familia de medidores de estado sólido*. Landis+Gyr Inc. Documento No. 011808-04, 2011. 69 p.

13. Ministerio de Energía y Minas. *Compendio de normas técnicas*. Comisión Nacional de Energía Eléctrica República de Guatemala. Guatemala, 2010. 287 p.
14. Organización Internacional de Metrología Legal. *Recomendación OIML R 46-1/-2 Medidores de energía eléctrica activa*. Francia: OIML, 2012. 92 p.
15. Radian Research. *RS-933 Syntron Automated Calibration System Operation Manual*. Radian Research, Inc. Ed part number 12-2012RR942011.C, 2012. 57 p.
16. Schneider Electric. *Manual de instalación Power Logic ION8650*. Ed part number 7ML02-0304-01, 2015. 98 p.

