



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

VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE CONTADORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Airons Alejandro Retana Esquivel

Asesorado por el Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, mayo de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Pérez Rivera
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Pérez Rivera
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE CONTADORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica, el 5 de junio del 2009.


Airóns Alejandro Retana Esquivel

Guatemala, 26 de enero de 2010

Ingeniero
José Guillermo Bedoya Barrios
Coordinador del Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Bedoya:

De acuerdo con la designación hecha por la Dirección de la Escuela, me permito informarle que he tenido bien asesorar el trabajo de graduación titulado **“VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE CONTADORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA”** siendo el tema desarrollado por el estudiante **Airons Alejandro Retana Esquivel**, encontrándolo satisfactorio, por lo que resuelvo dar mi aprobación al mismo, remitiéndole a la Coordinación para el trámite pertinente.

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

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Ing. Francisco Javier González López.

ASESOR



Ref. EIME 16. . 2010
Guatemala, 26 de FEBRERO 2010.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
“VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE CONTADORES DE
ENERGÍA ELÉCTRICA”, del estudiante, Airons Alejandro Retana
Esquivel, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
Coordinador del Área de Potencia

JGBB/sro





REF. EIME 20. 2010.

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 del estudiante; Airons Alejandro Retana Esquivel titulado: “VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE CONTADORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA”, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

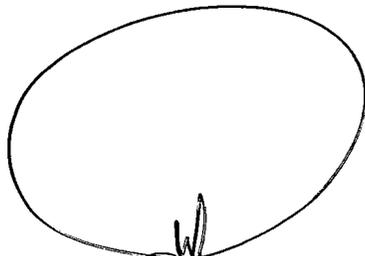


GUATEMALA, 9 DE ABRIL 2,010.



El Decano 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: **VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE CONTADORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario **Airons Alejandro Retana Esquivel**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, mayo de 2010

/cc
cc. archivo

ACTO QUE DEDICO A:

- DIOS:** Por ser la fuerza divina que me ayuda a luchar día tras día.
- MI HIJO:** Víctor Alejandro, por ser mi inspiración y el motivo fundamental en mi vida.
- MI MAMÁ (D.E.P):** Por haberme dado la vida y su apoyo incondicional
- MI ABUELA (D.E.P):** Por haberme educado como su hijo y corregirme para ser una persona de bien.
- MI HERMANO:** Víctor Alfonso Retana Esquivel, por su apoyo incondicional en todo momento
- MIS TÍOS:** Luis Armando (D.E.P), Liliana, Ninfa, Olga, Manolo, por su cariño y apoyo.
- MIS PRIMOS:** Luis Alexizz, Carmen, Julio (D.E.P), Jessica, Luisa, Esmeralda, Verónica, José, Manolo, Pablo, Mónica Damaris, por compartir sus alegrías.
- MI NOVIA:** Mirna Regina Valiente, por su apoyo y confianza, gracias por su cariño.

MIS AMIGOS:

Abner castellanos, Cristian Flores, Rubén Rodas, Omar Cárdenas, Cesar Orellana, Ligia Majus, Esdras Tobar, Wilmar Velásquez, Wilson López, Julio Muñoz, Dany Samayoa, Miguel Ventura, Luis Hernández, gracias por su amistad.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi asesor Ing. Francisco Javier González López: Por compartir sus conocimientos y el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Mi queridísima Universidad de San Carlos de Guatemala, por brindar a mí y a muchos profesionales de este país la oportunidad de desarrollarnos sin pedirnos prácticamente nada a cambio, que no sea esfuerzo y dedicación.

Mis amigos, por compartir su amistad.

A los catedráticos de la Escuela Ingeniería Mecánica Eléctrica, por brindarme su conocimiento en los salones de clases.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS	IXX
INTRODUCCIÓN	XXI

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE METROLOGÍA

1.1. Metrología.....	1
1.2. Metrología Eléctrica.....	1
1.3. Mediciones electromagnéticas.....	2
1.4. Magnitudes.....	2
1.5. Unidades.....	3
1.6. Mediciones.....	4
1.7. Características de las mediciones.....	5
1.8. Exactitud, repetitividad y reproducibilidad de una medición.....	6
1.9. Desviación estándar experimental.....	7
1.10. Incertidumbre de una medición.....	8
1.11. Errores y correcciones.....	11
1.12. Clasificación de errores y efectos.....	13
1.13. Error grueso o grave, error sistemático y error aleatorio.....	14
1.13.1. Error grueso.....	14
1.13.2. Error sistemático.....	15
1.13.3. Errores instrumentales.....	15
1.13.4. Errores ambientales.....	16
1.13.5. Error aleatorio.....	17

1.14.	Tolerancia.....	19
1.14.1.1.	Exactitud de un instrumento de medición.....	20
1.15.	Exactitud, repetitividad (precisión), sensibilidad y resolución de un instrumento de medición.....	20
1.15.1.1.	Repetitividad de un instrumento de medición.....	21
1.15.1.2.	Sensibilidad de un instrumento de medición.....	21
1.15.1.3.	Resolución de un instrumento de medición.....	22
1.16.	Umbral de un instrumento de medición.....	22
1.17.	Estabilidad, discreción, deriva y tiempo de respuesta.....	23
1.18.	Error de un instrumento de medición y errores máximos tolerados.....	25
1.19.	Especificaciones de un instrumento de medición.....	26

2. TEORÍA Y CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA

2.1.	Deducción de la relación entre energía y las revolución en el tiempo	33
2.2.	Constante.....	35
2.3.	La condición de 90°	37
2.4.	Diagrama vectorial.....	39
2.5.	Momento o par motor.....	42
2.6.	Momentos o pares de frenado.....	46
2.7.	Influencia de las variaciones de los parámetros.....	51
2.8.	Partes componentes.....	54
2.8.1.	Partes del sistema motor.....	54
2.8.2.	Rotor y cojinetes.....	59
2.9.	Imán de freno.....	63
2.10.	Mecanismo registrador.....	65

3. TIPOS DE MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

3.1.	Agrupaciones de los medidores.....	71
3.2.	Medidores de monofásicos de energía activa (A1, B1).....	72
3.3.	Esquema de conexiones de medidores monofásicos.....	75
3.4.	Medidores de energía reactiva.....	78
3.5.	Medidor monofásico de energía reactiva (A1, B2).....	80
3.6.	Medidores de energía aparente.....	82
3.7.	Medidores para fines específicos.....	83
3.8.	Medidores monofásicos y trifásico de doble tarifa.....	105
3.9.	Medidores de demanda Máxima (A1, B1, C2; A2, B1, C2; A2, B3, C2).....	94
3.10.	Medidores electrónicos.....	106
3.10.1.	Materiales y Metodos.....	108
3.10.2.	Ventajas y desventajas de los medidores electro.....	115
3.10.3.	Principios de la medición electrónica.....	117
3.10.4.	Mediciones en los contadores electrónicos.....	117
3.10.5.	Modos de operación.....	118
3.10.5.1.	Modo normal.....	118
3.10.5.2.	Modo alterno.....	118
3.10.6.	Formas de comunicación.....	120
3.11.	Caja sockets.....	121
3.12.	Capacidad.....	121
3.13.	Estilo.....	121
3.14.	Derivación (by pass).....	122
3.15.	Bornera de prueba.....	124
3.16.	Marchamos de seguridad.....	126
3.17.	Alambrado de cómo se conecta a la bornera de prueba para poder realizar las verificaciones.....	127
3.18.	Medición sin CTs.....	128

3.19.	Medición trifásica con CTs.....	130
4.	PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA	
4.1.	Objeto.....	133
4.2.	Alcance.....	133
4.3.	Definiciones.....	134
4.3.1.	Patrón de referencia.....	134
4.3.2.	Patrón de trabajo.....	134
4.3.3.	Ajuste.....	135
4.3.4.	Calibración.....	135
4.3.5.	Desviación estándar experimental.....	136
4.3.6.	Error de indicación de un instrumento de medida.....	137
4.3.7.	Error intrínseco de un instrumento de medición.....	138
4.3.7.1.	Incertidumbre de medida.....	138
4.3.8.	Resolución de un dispositivo visualizador.....	139
4.3.8.1.	Trazabilidad.....	140
4.4.	Generalidades.....	140
4.5.	Descripción.....	143
4.5.1.	Equipos y materiales.....	143
4.5.1.1.	Sistemas de sincronización.....	145
4.5.1.2.	cables adecuados.....	146
4.5.1.3.	Cronometro.....	146
4.5.1.4.	Nivel.....	147
4.5.1.5.	Termómetro.....	147
4.5.1.6.	Fasímetro o cofímetro.....	147
4.5.2.	Operaciones previas.....	148
4.5.3.	Procesos de calibración.....	150
4.5.4.	Toma y tratamiento de datos.....	153

4.6. Resultados.....	156
4.6.1. Cálculos de incertidumbres.....	156
4.6.2. interpretación de resultados.....	159
4.7. Referencias.....	165
4.7.1. Documentación necesaria para realizara la calibración.....	165
CONCLUSIONES.....	167
RECOMENDACIONES.....	169
BIBLIOGRAFÍA.....	171
ANEXOS.....	173

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Construcción del sistema motriz.....	32
2.	Variación del ángulo ϕ del diagrama vectorial del medidor.....	38
3.	Diagrama vectorial del medidor de energía eléctrica.....	40
4.	Forma del equipo motor de un medidor de energía eléctrica.....	41
5.	Significa que existen tres momentos parciales.....	42
6.	Flujo shunt está dividido en dos partes.....	47
7.	Momento de freno.....	48
8.	Polos del electroimán de intensidad.....	52
9.	Núcleo del electroimán de tensión (AEG).....	54
10.	Núcleo del electroimán de tensión (FUJI).....	55
11.	Núcleo de electroimán de una sola pieza general electric.....	55
12.	Núcleo de electroimán de una sola pieza UHER.....	56
13.	Regulación mediante un shunt magnético.....	58
14.	Chapa de aluminio de 1.5mm de espesor.....	61
15.	Chapa de aluminio con tornillo sin fin.....	61
16.	Tornillo sin fin.....	61
17.	Imán de freno tipo U de los medidores de energía eléctrica.....	63
18.	Medidores de energía eléctrica.....	65
19.	Lectura de datos de los medidores de energía eléctrica.....	67
20.	Construcción interna del medidor tipo esfera.....	68
21.	Tren de engranajes.....	69
22.	Medidor monofásico de energía activa.....	74
23.	Muestra dos marcas de medidores FUJI y AEG según IEC.....	75
24.	Esquemas de conexión de medidores monofásicos de energía activa.....	77

25.	Diagrama vectorial del medidor de energía reactiva.....	81
26.	Símbolos normalizados de los medidores de energía reactiva.....	90
27.	Conmutación de las tarifas con un relé.....	83
28.	Esquema de funcionamiento del mecanismo contador de doble tarifa para contadores AEG.....	84
29.	Reloj del medidor y discos de programación diaria.....	86
30.	Reloj del medidor y discos de programación diaria.....	86
31.	Medidor de doble tarifa.....	87
32.	Medidor de doble tarifa.....	88
33.	Esquemas de conexiones de medidor de doble tarifa.....	89
34.	Medidor tipo especial diagrama de carga máxima.....	91
35.	Medidor tipo especial diagrama de carga máxima.....	91
36.	Funcionamiento del medidor en diagrama de bloques.....	93
37.	Ejemplo de demanda máxima.....	95
38.	Mecanismo completo de un medidor de energía.....	98
39.	Medidores de energía eléctrica.....	100
40.	Principio de la espiral bimetálica.....	101
41.	Esquema de conexión del indicador de demanda.....	102
42.	Representa internas de un indicador de demanda.....	104
43.	Representa la curva exponencial de calor.....	105
44.	Diagrama circuital esquemático del sistema electrónico.....	114
45.	Gráficas analógicas – digital de los medidores electrónicos.....	117
46.	Carátula de contador quantum.....	119
47.	Pantalla del contador quantum.....	120
48.	Comunicación por puerto óptico y una computadora portátil.....	120
49.	Caja para el interior.....	122
50.	Caja de 13 terminales.....	123
51.	Caja para contador clase 200.....	124
52.	Bornera de prueba para caja tipo (ANSI).....	125
53.	Bornera de prueba tipo (IEC).....	125

54.	Conexión de medición secundaria.....	127
55.	Medidor sin CTs.....	129
56.	Diagrama vectorial de un medidor sin CTs.....	129
57.	Representacion de la medición con CTs.....	131
58.	Factor de potencia.....	142
59.	Sistemas de sincronización.....	146
60.	Proceso de calibración.....	150

TABLAS

I. Contiene las velocidades nominales y los pesos de los rotores en distintas marcas de los medidores monofásicos.....	60
II. Toma de datos para la verificación.....	154
III. Toma de datos solo con errores relativos.....	155
IV. Cálculo de incertidumbres.....	158
V. Nivel de confianza del 95.45%.....	162
VI. Tolerancias extendidas.....	162
VII. Tamaño y composición de la muestra según el lote.....	166

LISTADO DE SÍMBOLOS

CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
CD	Corriente directa
E	Energía
Hz	Hertzios (hert, frecuencia)
I	Intencidad (corriente)
V	Voltio (voltaje)
W	Vatio (vatio, potencia)
H	Hora
Kw	Kilovatio (mil vatios)
Kwh	Kilovatio hora
Mw	Megavatio
Ω	Ohm (resistencia)
\bar{x}	Media aritmética
μ	Letra griega μ representa la media geométrica
σ	Letra griega sigma σ representa la varianza
VAr	Voltamperios reactivos
VArh	Voltamperios reactivos hora
VA	Voltamperios
VAh	Voltamperios hora
P	Potencia activa
Q	Potencia reactiva
S	Potencia aparente
Ap	Energía eléctrica activa
Aq	Energía eléctrica reactiva
As	Energía eléctrica aparente

Ψ	Letra griega psi que representa un ángulo
Φ	Letra griega fi que representa un ángulo
φ	Letra griega ípsilon que representa un ángulo
A	Constante del medidor de energía eléctrica
M_m	Par motor
M_f	Momento torsional de frenado
δ	Letra griega delta representa error de medición
f	Frecuencia (60 hertz, valor industrial)
Z_u	Impedancia del la bobina del medidor
v	Velocidad del disco
fem	Fuerza electromotriz
F	Fuerza
UST	Tensión compuesta
Fp	Factor de potencia
R-S-T	Secuencia de fases
SCV 11	Tipo de medidor
t	Tiempo (segundos)
%	Porcentaje
TDM	Múltiplos por división de tiempo
J	Julio (joule, energía)

GLOSARIO

- Metrología** Es la ciencia de la medida. Tiene por objetivo el estudio de los sistemas de medida en cualquier campo de la ciencia. También tiene como objetivo indirecto que se cumpla con la calidad establecida.
- Energía eléctrica** La energía eléctrica se manifiesta como corriente eléctrica, es decir, como el movimiento de cargas eléctricas negativas, o electrones, a través de un cable conductor metálico como consecuencia de la diferencia de potencial que un generador esté aplicando en sus extremos.
- Mediciones** Es la determinación de la proporción entre la dimensión o suceso de un objeto y una determinada unidad de medida. La dimensión del objeto y la unidad deben ser de la misma magnitud. Una parte importante de la medición es la estimación de error o análisis de errores.
- Trazabilidad** Se entiende como trazabilidad aquellos procedimientos preestablecidos y autosuficientes que permiten conocer el histórico, la ubicación y la trayectoria de un producto o lote de productos a lo largo de la cadena de suministros en un momento dado, a través de unas herramientas determinadas.

Incertidumbre	Es el grado de desconocimiento o falta de información, porque existen desacuerdos sobre lo que se sabe o podría saberse.
Procedimiento	Un procedimiento es la acción de proceder o el método de ejecutar algunas cosas. Se trata de una serie común de pasos definidos, que permiten realizar un trabajo de forma correcta.
Error de medición	La inexactitud que se acepta como inevitable al comparar una magnitud con su patrón de medida. El error de medición depende de la escala de medida empleada, y tiene un límite. Los errores de medición se clasifican en distintas clases (accidentales, aleatorios, sistemáticos, etc.)
Tolerancia	La tolerancia puede ser especificada por un rango explícito de valores permitidos, una máxima desviación de un valor nominal.
Red de transmisión	Es parte del sistema de suministro eléctrico constituida por los elementos necesarios para llevar hasta los puntos de consumo y a través de grandes distancias la energía eléctrica generada en las centrales eléctricas

- Tarifa** La tarifa es el precio que pagan los usuarios o consumidores de un servicio público al Estado o al concesionario, a cambio de la prestación del servicio. Esta tarifa es fijada, en principio, libremente por el concesionario. Sin embargo, en los casos que lo determina la ley, la Administración fija - generalmente en colaboración con el concesionario - un precio máximo o tarifa legal.
- Corrientes de Foucault** En los núcleos de bobinas y transformadores se generan tensiones inducidas debido a las variaciones de flujo magnético a que se someten los núcleos. Estas tensiones inducidas son causa de que se produzcan corrientes parásitas en el núcleo (llamadas corrientes de Foucault).
- Tornillo sin fin** Desde el punto de vista conceptual, el tornillo sin fin es considerado una rueda dentada de un solo diente que ha sido tallado helicoidalmente (en forma de hélice). Este mecanismo ha sido diseñado para la transmisión de movimientos giratorios, por lo que siempre trabaja unido a otro engranaje.
- Patrón** Es un objeto o sustancia que se emplea como muestra para medir alguna magnitud o para replicarla

Verificación

Es el establecimiento de la veracidad de algo.

RESUMEN

La metrología es más que una ciencia, es un arte. Expresado de la manera más sencilla, la metrología es la ciencia de las mediciones en continuo desarrollo como consecuencia de la necesidad de mediciones más exactas. Es el campo del conocimiento concerniente a las mediciones.

Los contadores son instrumentos diseñados para la medición de la energía eléctrica consumida por el usuario; estos son utilizados por las empresas que facilita el suministro de energía eléctrica para la correcta facturación del consumo. Por tanto, estos aparatos son de gran importancia tanto para la empresa que facilita el suministro de energía eléctrica como para el usuario. Debido a su gran importancia estos instrumentos de medición tienen que tener una calibración, que se encuentre en el rango tolerable para cada tipo “sólidos y electromecánicos”.

Es necesario hacer una prueba al contador de energía eléctrica en base a la emisión de pulsos que es el valor kh este es la constante de watts/pulso, se determina que tan cercano esta al 100% de la medición que registra el patrón, luego hay que comparar los datos con los del medidor para verificar si está en su rango de correcto funcionamiento.

Los medios hostiles en los cuales el medidor de energía se puede deteriorar puede ser: el ambiente como la lluvia, temperatura, el sol. Primordialmente causa que los medidores sufran deterioro por el tiempo en que lleve de uso, se debe verificar la calibración con un patrón de referencia para establecer el error máximo de los medidores y así proceder con el procedimiento establecido en este documento para la calibración.

La verificación de la calibración se realizó con varios propósitos, el más importante es mantener un buen nivel de calidad de energía, es decir que mediante las mediciones que se obtienen en los medidores eléctricos deben de tener una incerteza de $\pm 0.2\%$ que es un rango que establece la norma con el nombre habilitación comercial NCC-14. En este documento se determinó un método para la verificación de la calibración de estos aparatos

OBJETIVOS

GENERAL:

Determinar un método que establezca un procedimiento para la verificación de la correcta calibración de medidores de energía eléctrica.

ESPECÍFICOS:

1. Determinar los distintos tipos de contadores de energía eléctrica que existen en el sistema eléctrico y con los cuales se hacen las mediciones en la república de Guatemala.
2. Conocer el funcionamiento del medidor de energía así como sus esquemas de conexiones.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación trata de una investigación detallada de un método para la verificación de la calibración de medidores de energía eléctrica el cual tiene por objetivo presentar una breve recopilación teórica de lo que es la ciencia de las mediciones “metrología”. Con base en esta ciencia se dan los lineamientos y parámetros de lo que se espera a la hora de la verificación tomando en cuenta que se debe tener bien claro lo que es el concepto y partes motrices de los medidores de energía, como también los diversos tipos de estos como sus conexiones en el sistema, ya que pueden ser monofásicos y trifásicos y/o de diferente tarifa como lo requieren algunos casos especiales del tipo de medida a requerir.

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se limita a la calibración de medidores de energía, mediante comparaciones con un patrón medidor de energía eléctrica, no es aplicable a medidores de elevada exactitud, que requieren el uso de instrumentos de mayor nivel metrológico.

En corriente alterna, los medidores pueden ser de energía eléctrica aparente, activa y reactiva, tanto en sistemas monofásicos como en sistemas polifásicos. Este no es aplicable a medida trifásica salvo que estén formados por tres sistemas de medida monofásica independientes, en cuyo caso se calibran por separado.

1. TÉRMINOS BÁSICOS Y GENERALES DE METROLOGÍA

1.1. Metrología

Expresado de la manera más sencilla, la metrología es la ciencia de las mediciones en continuo desarrollo como consecuencia de las necesidades de mediciones más exactas. Es el campo del conocimiento concerniente a las mediciones en continuo desarrollo como consecuencia del desarrollo general de la ciencia y tecnología, que de manera recíproca influye en el avance científico y tecnológico. La metrología permite a las personas hacer planes, realizar transacciones comerciales, aplicar o someterse a un tratamiento médico o ejecutar acciones con confianza, ya que la aplicación de esta ciencia está presente en todos los ámbitos del desarrollo humano. Inconscientemente la mayoría de las veces, las decisiones son tomadas en función de lo que relojes, balanzas, reglas, medidores de velocidad de automóviles, termómetros utilizados en clínicas médicas, etc. La metrología es de aplicación tan cotidiana que su importancia tiende a pasar desapercibida.

1.2. Metrología eléctrica

Evidentemente, la metrología eléctrica se ocupa de lo relativo a las mediciones de fenómenos electromagnéticos. En algunos laboratorios nacionales, el Departamento de Metrología Eléctrica también se ocupa de lo relativo a las mediciones de los fenómenos térmicos y del tiempo. La metrología eléctrica tiene también una gran importancia en casi todos los demás sectores de la industria moderna, como el de las telecomunicaciones, la informática, la industria automotriz, la robótica, la aviónica, la instrumentación, la medicina, el transporte etc.

1.3. Mediciones electromagnéticas.

Se encarga del mantenimiento y diseminación de patrones eléctricos, manteniendo la trazabilidad en las mediciones electromagnéticas industriales, así como la medición de otros parámetros físicos mediante transductores. Algunos sectores beneficiados: generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica, telecomunicaciones, medición, protección y automatización industrial, informática salud, industria eléctrica y electrónica, mantenimiento eléctrico en la industria.

1.4. Magnitudes

Una magnitud es un atributo de un fenómeno, cuerpo sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. Una magnitud es mensurable. Son magnitudes, entre otras, las siguientes: la longitud de una regla, la temperatura de un cuerpo, la longitud de onda de la luz monocromática, la tensión eléctrica en un tomacorriente, la densidad del aire, la corriente de un motor. Estos son términos utilizados en sentido particular. En sentido general, entre otras son magnitudes: longitud, densidad, temperatura, tiempo, masa, resistencia eléctrica, tensión eléctrica. Una magnitud puede determinarse cuantitativa o cualitativamente; por ejemplo cuando se mide una tensión eléctrica y obtiene un valor que se expresa como 120 voltios, se ha hecho una determinación cuantitativa de la tensión eléctrica. Pero si se expresa “la tensión del tomacorriente 1 es mayor a la tensión del tomacorriente 2” es porque se ha realizado hecho una expresión cualitativa.

Cuando se define un conjunto de magnitudes entre las cuales existen relaciones definidas (masa, longitud, tiempo, por ejemplo) se obtiene lo que se conoce con el nombre de sistema de magnitud (sistema métrico, sistema internacional). Un sistema de magnitudes generalmente está constituido por magnitudes base y magnitudes derivadas. Las magnitudes base son aquellas que en un sistema de magnitudes se acepta por convención como funcionalmente independiente unas de otras, mientras que las magnitudes derivadas son la magnitudes de un sistema que se definen en función de las magnitudes base de ese sistema. Por ejemplo la longitud, la masa y el tiempo son consideradas como magnitudes base en el campo de la mecánica. En el sistema internacional de unidades son magnitudes base las siguientes: longitud, masa, tiempo, temperatura, corriente eléctrica, intensidad luminosa y cantidad de sustancia.

La fuerza, igual a masa por aceleración es una magnitud derivada. Fuerza (magnitud derivada).

Es masa (magnitud base) por longitud (magnitud base) sobre el tiempo (magnitud base) al cuadrado.

Toda magnitud tiene una dimensión, siendo esta igual al producto de factores que representan una potencia de las magnitudes base del sistema de las cuales depende la magnitud.

1.5. Unidades

Una unidad de medida es una magnitud particular, definida y adoptada por convención, con la cual se comparan las otras magnitudes de la misma naturaleza para expresar cuantitativamente su relación con esta magnitud. Las unidades de medida tienen asignados en forma convencional nombres y símbolos. El metro es la unidad de medida de la longitud. Metro es el nombre de la unidad de medida y la longitud, la magnitud de la medida.

El símbolo de una unidad de medida es un símbolo que se le asigna en forma convencional a una unidad de medida.

El amperio es la unidad de medida de la corriente eléctrica, el voltio de la tensión y el ohmio de la resistencia eléctrica. Amperio, voltio y ohmio son unidades de medida de las magnitudes corriente, tensión y resistencia eléctrica, respectivamente. A, V y Ω , los símbolos correspondientes.

Para un sistema dado de magnitudes hay un sistema de unidades, entendido este como el conjunto de las unidades base y de las unidades derivadas, que se define de acuerdo con reglas determinadas.

1.6. Mediciones

Una medición se concibe como un conjunto de operaciones que tiene por objeto determinar el valor de una magnitud. Es, esencialmente, la comparación del valor de una magnitud, es, con respecto a otra tomada como referencia. Una medición es un conjunto de operaciones hechas sobre un objeto o sistema físico de acuerdo a un procedimiento documentado con el propósito de determinar algunas propiedades físicas del objeto o del sistema.

Las mediciones pueden llevarse a cabo manualmente o en forma automática. Las mediciones automáticas se han desimnado en la actualidad debido al avance tecnológico en el campo de la electrónica. Los instrumentos electrónicos, las telecomunicaciones y las técnicas digitales permiten las mediciones automáticas, guardar un registro de datos, procesarlos y transmitir los en tiempo real a cualquier lugar del planeta. Son los mismos equipos electrónicos los que realizan en muchos casos el procesamiento de los datos, realizando operaciones matemáticas produciendo gráficas como curvas de distribución gaussiana, calculando unos parámetros estadísticos importantes, comparando los valores con datos normalizados y emitiendo reportes y correcciones. En la actualidad los equipos electrónicos permiten hacer mediciones remotas y monitorear y controlar o corregir el comportamiento de un sistema de producción relativamente grande desde cualquier lugar de la tierra.

1.7. Características de las mediciones

La experiencia ha demostrado que algunos términos metrológicos son a menudo confundidos. ¿Cuál es la diferencia entre exactitud y precisión, resolución y sensibilidad, estabilidad y ruido, respetabilidad y reproducibilidad, estabilidad y reproducibilidad, error e incertidumbre, exactitud e incertidumbre? En su ejercicio profesional, los ingenieros se fundamentan en las mediciones para la toma de decisiones técnicas, razón por la cual es muy importante tener claro el significado de cada uno de esos términos y la diferencia entre ellos.

Como se indicó líneas arriba, algunas veces la resolución es confundida con la exactitud. Esta mala concepción, a menudo relaciona a instrumentos con lecturas digitales donde una similar asunción es que, por ejemplo, un contador de frecuencia con 11 dígitos debe ser 100 veces más exacto que otro contador con resolución de 9 dígitos. La resolución es justamente la discriminación que el instrumento puede demostrar. Es el valor más pequeño que el instrumento de medición es capaz de indicar, pero esto dista mucho de concordar con la definición de la exactitud cómo se verá más adelante.

Pero, ¿Qué hay de la sensibilidad y la resolución? Mientras que la resolución es una medida del cambio más pequeño posible en la salida (indicación), la sensibilidad relaciona al cambio más pequeño en la entrada (estimulo) que causa un cambio discernible en la salida. En tal sentido, existe una asociación entre dos términos, pero obviamente no significan lo mismo.

1.8. Exactitud, repetitividad y reproducibilidad de una medición

La exactitud de una medición es la concordancia entre el resultado de una medición y el valor convencionalmente verdadero de la magnitud medida. Es un número que indica la cercanía entre el valor convencionalmente verdadero y el valor medido. Especifica la diferencia entre el valor medido y el valor convencionalmente verdadero de la magnitud y se considera como un concepto cualitativo. Esta diferencia puede ser relativamente grande o relativamente pequeña. Los resultados de poca exactitud se pueden obtener fácilmente en poco tiempo y con métodos e instrumentos simples; los de “muchísima exactitud”, en cambio, requieren de tiempo, paciencia, equipo costoso, alto nivel de preparación y conocimientos del experimentador. Debe tenerse en cuenta los fines para los cuales se utilizarán los datos obtenidos: taller, producción, experimentos, investigación, mantenimiento, etc. Los metrologos prefieren el término “incertidumbre” de la medición (por ejemplo, “este voltímetro digital tiene una incertidumbre de 4ppmm), en lugar de “exactitud” (por ejemplo, este voltímetro es 99.9996% exacto).

La repetitividad (de resultados de mediciones) se define como la proximidad de concordancias entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurado realizadas bajo las mismas condiciones de medición.

La reproducibilidad es la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones del mismo mensurado realizadas bajo condiciones variables de medición. Es la precisión bajo condiciones que no necesariamente se repiten, o condiciones variables o condiciones de reproducibilidad. La reproducibilidad es la obtención de resultados muy próximos cuando ellos son obtenidos con el mismo método en idénticos ítems de prueba en laboratorios diferentes con diferentes operadores usando diferente equipo, y puede ser expresada

cuantitativamente en términos de las características de dispersión de los resultados, siendo estos, habitualmente, los resultados corregidos. También puede expresarse como la cercanía de acuerdo o concordancia entre los resultados de mediciones del mismo mensurado en diferentes lugares por personal diferente usando el mismo método de medición en ambientes similares.

Una expresión válida de reproducibilidad requiere que se especifiquen las condiciones que variaron, entre estas se encuentran: principio de medición, observador, instrumento de medición, patrón de referencia, lugar, condiciones de uso y tiempo.

1.9. Desviación estándar experimental

La medida de la precisión se expresa usualmente en términos de imprecisión de las mediciones mediante la desviación típica muestra o desviación estándar experimental. La desviación estándar experimental se define así: Para una serie de n mediciones del mismo mensurado, es la magnitud S que caracteriza la dispersión de los resultados, dada por la fórmula siguiente.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Donde:

x_i Es el resultado de una de las mediciones y \bar{x} es la medida aritmética de los n resultados de considerados.

Si se considera la serie de n valores como muestra de una distribución, \bar{x} es un estimado insesgado de la media μ , y s^2 es un estimado insesgado de la variancia σ^2 de esta distribución.

La expresión $\frac{s}{\sqrt{n}}$ es un estimado de la desviación estándar de la distribución de \bar{x} y es

Llamada la desviación estándar experimental de la media, siendo éstas algunas veces incorrectamente llamada error estándar de la media.

1.10. Incertidumbre de una medición

El término incertidumbre significa “duda”. Si se aplica al resultado de una medición, el vocablo incertidumbre significa duda sobre la validez del resultado de la medición. La incertidumbre, es consecuencia de la imperfección en la realización de las mediciones, y se le define como un parámetro asociado al resultado (de la medición) que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurado. El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar (o un múltiplo de ella), o la mitad de un intervalo de un nivel de confianza determinado. Es decir, la incertidumbre es una estimación o un estimado que caracteriza el intervalo de valores en el que sitúa, generalmente con una alta probabilidad dada, el valor verdadero de la magnitud medida. Simplificando la expresión, la incertidumbre de una medición es un valor estimado para caracterizar el rango de valores dentro del cual se encuentra el valor verdadero de la magnitud de medición.

En la práctica, hay muchas fuentes de incertidumbre en una medición, entre ellas:

Definición incompleta del mensurado

Realización imperfecta de la definición del mensurado

Muestreos no representativos –la muestra medida puede no representar el mensurado

Conocimiento inadecuado de los efectos de las condiciones ambientales sobre las mediciones, o mediciones imperfectas de dichas condiciones ambientales

Errores de apreciación del operador en la lectura de instrumentos analógicos

Resolución final del instrumento o umbral de discriminación finito

Valores inexactos de patrones de medición y materiales de referencia

Valores inexactos y otros parámetros obtenidos de fuentes externas y usados en los algoritmos de reducción de datos

Aproximaciones y suposiciones incorporadas en los métodos y procedimiento de medición

Variaciones en observaciones repetidas del mensurado bajo condiciones aparentemente iguales

Inestabilidad de los dispositivos y componentes de los instrumentos de medición.

Ahora bien, ¿Por qué es tan importante la incertidumbre o cálculo? La verdad es que al reportar el resultado de una medición estamos obligados a proporcionar alguna indicación cuantitativa de la calidad del mismo. Sin esta indicación los resultados de las mediciones no pueden ser comparados, ni entre ellos, ni con valores de frecuencia establecidos por una especificación o norma. Por tanto, es necesario que exista un procedimiento, fácil de usar y aceptado de manera general para caracterizar la calidad del resultado con una medición, esto es, para evaluar y expresar su incertidumbre. Esto significa que

es importante conocer la incertidumbre del resultado de una medición con el objeto de caracterizar su calidad. El concepto de incertidumbre como atributo cuantificable es relativamente nuevo en la historia de las mediciones, a pesar de que conceptos como errores y análisis de error han sido parte de la ciencia de la medición por largo tiempo.

Actualmente se acepta que cuando todas las componentes conocidas o supuestas, de los errores han sido evaluadas y se han aplicado las correcciones; aún persiste una incertidumbre acerca de la confiabilidad del resultado; o sea, existe duda sobre cuán bien representa el resultado de la medición al valor de la magnitud particular del objeto, de medición (mensurado).

En el vocabulario internacional de Metrología –VIM- también se establece que “la incertidumbre de una medición comprende, en general, muchos componentes. Algunos de estos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden ser caracterizados por desviaciones estándar experimentales (evaluación de la incertidumbre tipo A). Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por desviaciones estándar, son evaluados admitiendo distribuciones de probabilidad basadas en la experiencia u otra información (evaluación de la incertidumbre tipo B)”. La consideración de ambas, lleva a obtener la incertidumbre combinada.

En algunos casos se encuentra el término “Incertidumbre mínima de medición posible”. Esta es la incertidumbre de medición que para cada magnitud así como para rangos de medición especificados es asignada (sobre la base de la evaluación de la incertidumbre total de medición y dado el caso de de interoperaciones ejecutadas) a un laboratorio con la mínima incertidumbre de medición. La incertidumbre mínima de medición posible (en inglés: *best*

measurement capability, traducida en forma literal al español es mejor capacidad de medición) toma en cuenta las distribuciones del dispositivo de medición patrón a la incertidumbre de medición bajo las condiciones, más favorables, pero no toma en consideración las influencias del instrumento a calibrar ni las posibles desviaciones de las condiciones nominales de la calibración. Por siguiente, la incertidumbre de medición que debe ser indicada en un certificado de calibración es generalmente más grande que la incertidumbre mínima de medición posible.

1.11. Errores y correcciones

El proceso de medición es un hecho físico que adolece de imperfecciones que dan origen al error, pero error e incertidumbre son dos conceptos diferentes que no deben confundirse. El error es un concepto idealizado y los errores no pueden ser conocidos exactamente. Una inexactitud en el proceso origina la deformación del resultado, y en consecuencia el valor obtenido difiere de “un valor verdadero” de la magnitud medida. Sin embargo, para efectos puramente cualitativos, diferimos algunos conceptos relacionados con el error.

El error o error absoluto es el resultado de una medición menos un valor verdadero del mesurado. Es la diferencia entre el resultado de la medición y un valor verdadero de la magnitud medida. Como no es posible conocer el valor de una magnitud, porque sería el resultado de una medición perfecta, en la práctica, se utiliza el valor convencionalmente verdadero. Si x es el resultado obtenido en la medición y x_0 . El valor convencionalmente verdadero, entonces el error absoluto Δ es:

$$\Delta = x - x_0.$$

Obsérvese que el error absoluto constituye el módulo de error.

Si el error de la medición se divide por valor verdadero del medurado, se conoce con el nombre de error relativo. Por la razón antes explicada, en la práctica se utiliza el valor convencionalmente verdadero.

$$\delta = \frac{x - X_0}{X_0}$$

En valores relativos, o

$$\delta = \frac{x - X_0}{X_0} \times 100$$

100 en porcentaje (%).

Debe tenerse claro que el valor verdadero del error no podrá nunca ser conocido exactamente, si no solo estimado, debido a que no se puede conocer el valor verdadero de la magnitud mediana.

El error absoluto con el signo cambiado se denomina corrección, luego la corrección es:

$$\text{Corrección} = -\Delta = x_0 - x.$$

Como se verá después, los errores se originan debido a varias causas, entre las cuales tenemos las siguientes: el método y/o los instrumentos empleados inadecuadamente, falta de conocimiento de todas las condiciones con la magnitud mediana, experiencia insuficiente del observador y variación de parámetro consideras como constantes durante la medición.

1.12. Clasificación de errores y efectos

En el inciso 1.3.4. se dio la definición del error. En este subcapítulo se adentrará más al respecto, conociendo acerca de su clasificación. En general, el error se divide en errores gruesos o graves, errores sistemáticos y errores aleatorios.

1.13. Error grueso o grave, error sistemático y error aleatorio

1.13.1. Error grueso

El error grueso se debe principalmente a fallas humanas en la lectura o en la lectura o en la utilización de los instrumentos, así como en el registro y cálculo de los resultados de las mediciones. Ejemplos, mala lectura de instrumentos de medición, elección incorrecta de la escala, desconocimiento del efecto del instrumento sobre el mensurado, ajuste incorrecto del instrumento de medición y aplicación no apropiada, registro incorrecto de los resultados de la medición, equivocación en los cálculos. Estos errores se presentan por ignorancia de conceptos relativos a la metrología o por descuido, malos hábitos o negligencia. Aunque resulta relativamente difícil su eliminación, debe procurarse anticiparlos y eliminarlos. Un error de este tipo se detecta más fácilmente cuando para la medición de un mensurado se efectúa más de una lectura, preferiblemente por observadores distintos. Se obtiene 10 resultados, por ejemplo, al efectuar mediciones de temperatura del organismo humano, y todos los resultados difieren en menos de 0.1 °C con respecto a 37 °C, excepto uno que da un valor igual a 41 °C, es porque seguramente se ha cometido un error grueso. (Se se ve la importancia de que el médico mida varias veces, por lo menos 3)

Otro ejemplo de error grueso se presenta cuando un experimentador no toma en cuenta el efecto de carga introducido por un voltímetro al medir voltaje en una resistencia de valor mucho mayor que el de la resistencia del voltímetro (aunque debido a ser un error a causa del instrumento puede considerarse como un error sistemático. Se considera grueso en el sentido de la ignorancia de quien mide el respecto al efecto de carga, pero es sistemático si se considera que a pesar del instrumento introduce una componente de error y de incertidumbre). Otro ejemplo es el caso en que se mide una resistencia por la técnica de 2 terminales, cuando en realidad requiere la técnica de 4 terminales, o se usa el puente Wheatstone en lugar de usarse el puente doble de Kelvin.

1.13.2. Error sistemático

El error sistemático se define como la media que resultaría de un número infinito de mediciones del mismo mensurado realizada bajo condiciones de repetitividad menos un valor verdadero del mensurado. Un error sistemático, de origen conocido, se debe a fallas de los instrumentos, como partes defectuosas o gastadas y efectos ambientales sobre el equipo de medición y el mensurado. Por ejemplo, en el instrumento básico de bobina móvil fricción de los cojinetes de varios componentes móviles pueden causar resultados erróneos. Sin embargo, para el error sistemático, de forma parecida la valor verdadero, sus causas no son completamente conocidas y no podrá eliminarse, solo reducirse. Los errores sistemáticos se dividen en instrumentales y ambientales.

1.13.3. Erros instrumentales

Estos son propios de los instrumentos, incluyendo su falta de calibración. En el caso de instrumentos mecánicos o electromecánicos están sujetos a desgaste de sus partes. El instrumento básico de bobina móvil del párrafo anterior es un ejemplo claro de este tipo de error. Los siguientes son otros ejemplos: si la “pesa” de una balanza no se utiliza con cuidado puede sufrir un desgaste que introduce error en la medición; la variación de la constante de un resorte es otro elemento capaz de introducir una componente de error sistemático instrumental.

Para detectar el posible error introducido por un instrumento de medición debe someterse a calibración, es decir debe compararse con otro instrumento considerado como patrón. El error instrumental puede reducirse seleccionando el instrumento adecuado para un uso particular, aplicando factores de corrección al resultado de la medición o calibrando el instrumento de la medición.

1.13.4. Errores ambientales

Estos errores se deben a magnitudes de influencias presentes en el ambiente donde se realiza la medición. Son magnitudes de influencia, entre otras, la temperatura, el flujo magnético, la intensidad de campo eléctrico, la presión barométrica, la humedad relativa. Para analizar el error sistemático o errores sistemáticos, tómese un ejemplo de errores originados por dos causas: una por inexacta determinación de los parámetros (magnitudes de influencia) medidos y la otra por la variación, durante la medición de estos parámetros. La magnitud buscada, y es función de una serie de parámetros auxiliares y se expresa de la manera siguiente:

$$Y = f(X, A, B, C; \dots; N)$$

Donde X es el parámetro que se mide y los parámetros $X, A, B, C; \dots; N$ se consideran constantes.

Si se determina erróneamente el parámetro X, su valor registrado es $X + \Delta X$, y esto hace que Y se evalúe con error. Su valor será:

$$Y + \Delta Y = f(X + \Delta X, A, B, C; \dots, N)$$

Obviamente, ΔY es el error de la magnitud Y, y se define como:

$$Y + \Delta Y = f(X + \Delta X, A, B, C, \dots, N)$$

El Valor Relativo de Y, δ_Y , es

$$\frac{(Y+\Delta)-Y}{Y} = \frac{\Delta Y}{Y} = \delta_Y = \frac{f(X+\Delta X, A, B, C, \dots, N) - f(X, A, B, C, \dots, N)}{f(X, A, B, C, \dots, N)}$$

Por ejemplo, se desea averiguar el valor de una corriente en una resistencia, pero únicamente podemos medir la resistencia y la caída de voltaje en ella, si una de estas magnitudes se mide con error, este será trasladado a la magnitud de interés que depende de ellas. Sin considerar el error, la corriente es:

$$I = f(R, V) = \frac{V}{R}$$

Si el valor de R se ha determinado con un error positivo, intervendrá en la ecuación $R+\Delta R$. al incluirse en el cálculo de I, se tiene

$$I + \Delta I = f(R + \Delta R, V) = \frac{V}{R + \Delta R}$$

Luego, el error relativo será:

$$\delta_I = \frac{\Delta I}{I} = \frac{(I + \Delta I) - I}{I} = \frac{f(R + \Delta R, V) - f(R, V)}{f(R, V)} = \frac{\frac{V}{R + \Delta R} - \frac{V}{R}}{\frac{V}{R}}$$

$$\delta_I = \frac{\Delta I}{I} = \frac{\frac{RV - RV - \Delta RV}{(R + \Delta R)R}}{\frac{V}{R}} = \frac{-\Delta R}{R + \Delta R}$$

1.13.5. Error aleatorio

El error aleatorio es el resultado de una medición, menos la media que resultaría de un número infinito de mediciones de un mismo mensurado realizadas bajo condiciones de repetitividad. El error aleatorio se debe a causas desconocidas y es el error presente cuando los errores sistemáticos han sido ya considerados, es un error consistente en apreciables diferencias entre las últimas cifras de los resultados. Este error supuestamente se presenta por variaciones imprescindibles y estocásticas, temporales y espaciales, de las magnitudes de influencia. Los efectos aleatorios dan origen a las variaciones en observaciones repetidas del mensurado. En mediciones de alta exactitud los errores aleatorios son importantes, aunque no sean muy importantes, aunque no sean muy grandes. Supongamos que con un termómetro de resistencia de platino se mide la temperatura de un horno eléctrico que contiene un grupo de 3

celdas de tensión eléctrica tipo Weston no saturadas. Habiendo calibrado debidamente el termómetro y suponiendo invariable el valor de la temperatura, al tomar lectura cada 15 minutos estas varían ligeramente durante el periodo de observación. Este error no puede conocerse ni corregir por ningún método de control conocido, y su tratamiento solo puede hacerse mediante el análisis estadístico, no para conocerlo exactamente sino para determinar un estimado de él. Los errores aleatorios pueden reducirse aumentando el número de observaciones.

La evaluación del error aleatorio está basada en el cálculo de probabilidad y en la estadística matemática. Esta evaluación, consiste realmente en una estimación, solo permite determinar su valor probable y el margen dentro del cual estaría ubicado este error.

El error aleatorio es un evento independiente que no guarda relación alguna con las posibilidades la aparición de cualquiera de los demás tipos de errores. A demás en cada medición puede aparecer únicamente un error aleatorio y de un solo valor. El error aleatorio pequeño más frecuentemente que el error grande, debido a que las mediciones se efectúan en condiciones en las cuales se persiguen resultados con el menor error posible. Finalmente, la probabilidad del error aleatorio disminuye con el aumento del valor absoluto del error. Combinando conceptos anteriores, el error es igual a la suma de todos los errores y se considera que no se incurrirá en errores gruesos, el error es igual a la suma del error sistemático y el error aleatorio. Sin embargo, nunca se podrá conocer el valor del error.

$$\textit{Error} = \textit{error sistemático} + \textit{error aleatorio}$$

1.14. Tolerancia

La tolerancia se define como el máximo error permitido que se encuentra en una medición. Nada es absolutamente preciso nunca y cualquier procedimiento, por metodoso que sea, debe establecer un margen para la desviación de la media precisa, conociéndose como tolerancia dicho margen. La tolerancia debe ser especificada para lograr los resultados esperados en una medición, siendo además la base para la elección consecuente de patrones de referencia e instrumentos de medición.

Los instrumentos de medición se usan con fines de control en un proceso de fabricación y esto es válido para cualquier empresa manufacturera, pequeña o grande. La tolerancia de diseño, o especificada en forma previa a la fabricación de un producto, se garantiza realizando mediciones con instrumentos suficientemente exactos. Es decir, los instrumentos de medición nos permiten comprobar el cumplimiento de las tolerancias; pero las tolerancias no son iguales en todos los casos (o no es la misma tolerancia para todos los casos), si no que dependen del campo de aplicación. En un taller mecánico de los que se conocen en esta ciudad, por ejemplo, la tolerancia puede ser del orden de unas decimas de milímetros; pero en el lugar donde se ha fabricado la pieza original la tolerancia puede ser del orden de milésimas de milímetros. Ahora bien, si nos referimos al campo de la nanotecnología, la tolerancia puede ser del orden de los nanómetros y los subnanonómetros. Nótese pues, que la calidad de la instrumentación, las condiciones ambientales del lugar donde se efectúa las mediciones y la competencia técnica de quienes hacen uso de los instrumentos de medición dependen de la aplicación, de la cual depende la tolerancia.

1.15. Exactitud, repetitividad (precisión), sensibilidad y resolución de un instrumento de medición

1.15.1. Exactitud de un instrumento de medición

Al hacer referencia en la exactitud de una medición establecida es la concordancia entre el resultado de una medición y el valor convencionalmente verdadero de la magnitud medida. Con relación a un instrumento de medición, la exactitud es la habilidad que él tiene para hacer mediciones con pequeña incertidumbre, considerándose como un concepto cualitativo. Aunque es muy común hablar de clase de exactitud, pocas veces nos interesamos en saber sobre su definición, llamándose así a la clase de instrumentos que satisfacen ciertos requisitos metrológicos destinados a mantener los errores dentro de límites especificados. Una clase de exactitud se indica generalmente por un número o símbolo adoptado por convención denominado índice de clase. Por ejemplo, en metrología de masa, las pesas se definen como clase F, clase E, clase M, o contadores de energía eléctrica clase 10.

1.15.2. Repetitividad de un instrumento de medición

La repetitividad de un instrumento de medición es la aptitud de éste para proporcionar indicaciones próximas entre sí por aplicaciones repetidas del mismo mensurado bajo las mismas condiciones de medición. Estas condiciones incluyen: reducción del mínimo de las variaciones debidas al observador; el mismo procedimiento de medición; el mismo observador; el mismo equipo de medición, utilizado bajo las mismas condiciones; el mismo lugar; repetición en un periodo corto de tiempo. La repetitividad puede expresarse cuantitativamente en términos de las características de dispersión de los resultados. La

repetitividad es la precisión del instrumento de medición que al estimarse con desviaciones estándar es la incertidumbre del instrumento de medición.

1.15.3. Sensibilidad de un instrumento de medición

La sensibilidad de un instrumento de medición, es que cambia en su respuesta dividido por el correspondiente cambio del estímulo. También se puede decir que la sensibilidad de un instrumento es la relación entre la señal de salida o respuesta y la señal de entrada o magnitud de medida. La sensibilidad puede depender del valor del estímulo. Por ejemplo, para un galvanómetro la sensibilidad se puede expresar como mm/mA, aunque nos indica cuantos milímetros se defleca la aguja por cada milímetro que “pasa” a través del instrumento.

1.15.4. Resolución de un instrumento de medición

La resolución (de un dispositivo indicador) es la diferencia más pequeña entre las indicaciones de un dispositivo indicador que puede ser distinguido significativamente. O el cambio más pequeño en el valor medido al cual responde el instrumento. Cuando se dice que un voltímetro, por ejemplo, tiene una resolución de $1\mu\text{V}$ significa que éste es el valor más pequeño que se puede medir con dicho voltímetro. Cuando el instrumento posee una escala, la resolución corresponde a una división comprendida entre las primeras dos marcas de la escala. Para un dispositivo indicador digital, este es el cambio en la indicación cuando el dígito significativo más pequeño cambia un paso (o da un salto).

1.16. Umbral de movilidad de un instrumento de medición

También es importante ver lo relativo al umbral de movilidad. Este se define como la variación más grande en la señal de entrada que no provoca una variación detectable de la respuesta de un instrumento de medición, siendo la variación de la señal de entrada lenta y monótona. El umbral de movilidad puede depender, por ejemplo, del ruido (interno externo), de la fricción.

La movilidad, entonces, es la aptitud de un instrumento de medición para responder a pequeñas variaciones del valor de la señal de entrada.

1.17. Estabilidad, discreción, deriva y tiempo de respuesta

La estabilidad de un instrumento de medición es la aptitud que éste para mantener constante en el tiempo, sus características metrológicas. Por ejemplo, un fabricante podría especificar la estabilidad de largo plazo como: “resultado de la medición ± 2 ppm durante seis meses”. Esto significa que el fabricante no garantiza que la incertidumbre se mantenga más allá de 6 meses. Quizá el mismo fabricante especifique en el mismo documento que para doce meses la estabilidad es tan buena como “el resultado de la medición ± 8 ppm”. Esto es lo que en la práctica ocurre y obliga a definir un período de calibración del instrumento de medición. Ha habido personas que han dicho que sus instrumentos de medición no necesitan ser recalibrados, puesto que se los han garantizado de por vida. Esta manera equivocada de pensar muchas veces obedece a que los usuarios de los instrumentos de medición consideran injustificable el gasto en calibración; otras, la ignorancia de los asuntos metrológicos los lleva a caer en actitudes que constituyen un error fuera de clasificación.

En caso de que la estabilidad se considere en función de otra magnitud diferente del tiempo, esta debe ser mencionada claramente.

La estabilidad puede ser cuantificada en varias formas, por ejemplo: por el tiempo en el cual cambia una característica metrológica por una cantidad dada, o el cambio de una característica en un tiempo determinado.

Sin embargo, la estabilidad de un instrumento de medición sufre con el tiempo cierto deterioro, al cual contribuye la derivada del instrumento de medición, la cual se considera como una variación lenta de una característica metrológica de un instrumento de medición.

Por otro lado, la discreción es la aptitud de un instrumento de medición para no alterar el valor del mensurado. Ejemplos: a) una balanza es un instrumento discreto para la medida de la masa; b) un termómetro de resistencia que calienta el medio que cuya temperatura va a medir no es discreto.

También es importante tomar en cuenta que la respuesta de un instrumento de medición no puede ser instantánea, sino que responderá cierto tiempo después de aparecer el estímulo. Este recibe el nombre de tiempo de respuesta y se define como el intervalo de tiempo que comprende el instante en el cual una señal de entrada es sometida a un cambio brusco especificado y el instante en el cual la señal de salida alcanza dentro de límites especificados un valor en régimen estable y sostenido. Por ejemplo, la respuesta de un termómetro es relativamente lenta y depende mucho de la rapidez con la cual el termómetro responde a un estímulo.

Ocurre que cuando se obtiene una indicación de un instrumento de medición ante valores decrecientes de la magnitud medida se obtiene una indicación distinta para el mismo estímulo pero con valores crecientes. Hay cierto “retraso” de las indicaciones con valores decrecientes respecto de las indicaciones con valores crecientes. Esta característica se conoce con el nombre de histéresis y es, precisamente, la propiedad de un instrumento de medición mediante la cual la indicación del valor de una magnitud cuando se toma en forma creciente difiere del mismo cuando se toma en forma decreciente. Es decir que las respuestas a una señal de entrada dada depende de la secuencia de las señales de entrada (o los valores de las magnitudes de influencia) precedentes. Para comprobar la histéresis se hacen mediciones de magnitudes variables; primero la magnitud se puede hacer crecer desde cero hasta un valor máximo y luego se le hace decrecer hasta cero. La diferencia entre los valores crecientes y los valores decrecientes indica que el instrumento tiene histéresis, siempre y cuando esta histéresis no sea propia del sistema en el que se efectúa la medición.

1.18. Error de un instrumento de medición y errores máximos tolerados

El error de un instrumento de medición se define como la diferencia entre la indicación de un instrumento de medición y un valor verdadero de la magnitud de entrada correspondiente. Puesto que un valor verdadero no puede ser determinado, en la práctica se utiliza un valor convencionalmente verdadero. Este concepto se aplica principalmente cuando un instrumento se compara con un patrón de diferencia, por ejemplo, cuando se somete a calibración. Para una medida materializada, como una masa, la indicación es el valor que tiene asignado.

Los errores máximos tolerados o los errores límites permitidos (de un instrumento de medición) son los valores externos de un error permitido (tolerado) por las especificaciones, regulaciones, etc., para un instrumento de medición dado. Mientras que el error en el punto de control (de un instrumento de medición), se considera como el error de un instrumento de medición para una indicación específica o para un valor específico del mensurado, elegido para la verificación del instrumento.

1.19. Especificación de un instrumento de medición

La selección de instrumentos de medición se basa, usualmente, en sus especificaciones escritas, ya que únicamente éstas son el medio del cual disponen los usuarios para la determinación del equipo adecuado para una aplicación particular. Las especificaciones técnicas son una descripción escrita del funcionamiento de un instrumento de medición en términos cuantificables y aplica a una población de instrumentos que tienen el mismo número de modelo. Y puesto que las especificaciones están basadas en estadísticas del funcionamiento de una muestra suficientemente grande de instrumentos, ellas describen el comportamiento del grupo más que el comportamiento de un instrumento solo.

Más que especificar un instrumento de medición, en esta sección nos referimos a la interpretación de especificaciones técnicas. En general no existen reglas que uniformicen la forma en que tales especificaciones deben ser declaradas. Algunos fabricantes preguntan las especificaciones de sus instrumentos de una manera muy conservadora con el fin de incluir los efectos de factores no controlables que puedan interferir en el funcionamiento correcto

de sus instrumentos y esto significa que sus instrumentos se comportan mejor aún que sus especificaciones. Por el otro lado, utilizando técnicas de publicidad, un instrumento puede parecer mejor que otro. En los dos casos el usuario tiene la responsabilidad de dedicar un tiempo para satisfacer a conciencia todos los cuestionamientos técnicos que requieran satisfacer los instrumentos de medición para su particular necesidad.

No obstante, se puede decir que una buena especificación técnica de un instrumento de medición debe tener las siguientes características:

Contener todos los datos importantes que caracterizan al instrumento de medición: impedancia de entrada, incertidumbre, etc.

Explicación completa sobre sus aplicaciones

Fáciles de interpretar y usar.

Debe definir los efectos del medio ambiente y el agua.

2. TEORÍA Y CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DE ENERGÍA

Las mediciones de la energía eléctrica que se efectúan mediante medidores o contadores, se utilizan para calcular el valor de la energía que vende al consumidor la compañía suministradora. También se utilizan para el control de la energía gastada en las redes, fábricas, etc.

Debido a que las relaciones monetarias se basan sobre las lecturas de medidores, tanto la producción como la venta y uso de estos instrumentos están sometidos en todos los países de un estricto control de las oficinas estatales de pesas y medidas.

La energía utilizada o suministrada se puede se puede determinar de la manera siguiente: cuando de una línea se recibe una intensidad de corriente i , bajo la tensión v , donde tanto v como i pueden variar en el tiempo; la potencia instantánea es $P = i * v$ y la energía A utilizada entre los instantes t_1 y t_2 se pueden expresar:

$$\int_{t_1}^{t_2} p * dt = \int_{t_1}^{t_2} v * i * dt$$

La función de un medidor de energía o contador es sumar e indicar este trabajo eléctrico que corresponde al consumo de la energía, en forma continua. En consecuencia, la medición de la energía es la medición de la potencia con la simultánea integración en el tiempo, un medidor o contador de energía es en realidad un vatímetro giratorio provisto de un dispositivo integrador-numerador.

Los mismos principios que sirven para construir vatímetros valen también para la construcción de medidores de energía eléctrica; por ejemplo, el vatímetro electrodinámico es el principio de construcción de un medidor de energía corriente continua y el vatímetro de inducción es la base de la construcción del medidor de corriente alterna.

Dada la importancia y la extensión mundial de las redes de corriente alterna, la mayor parte de medidores que hoy día se utilizan son medidores de corriente alterna y concretamente tipos basados en el sistema motor de inducción. A estos medidores se refieren los capítulos dedicados a los medidores de energía en la obra presente.

Los medidores de energía eléctrica de corriente alterna pueden ser adaptados para medir por separado varios tipos de energía que influyen en la tarifa, la potencia de corriente alterna puede ser representada por sus tres componentes: la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la potencia aparente (S). De igual manera se distinguen 3 tipos de energía:

Energía eléctrica activa:

$$A_p = \int_{t_1}^{t_2} v * i * \cos \varphi * dt \quad (Wh); (kWh); (MWh)$$

Energía eléctrica reactiva:

$$A_Q = \int_{t_1}^{t_2} v * i * \sen \varphi * dt \quad (VArh); (kVArh); (MVArh)$$

Energía eléctrica aparente:

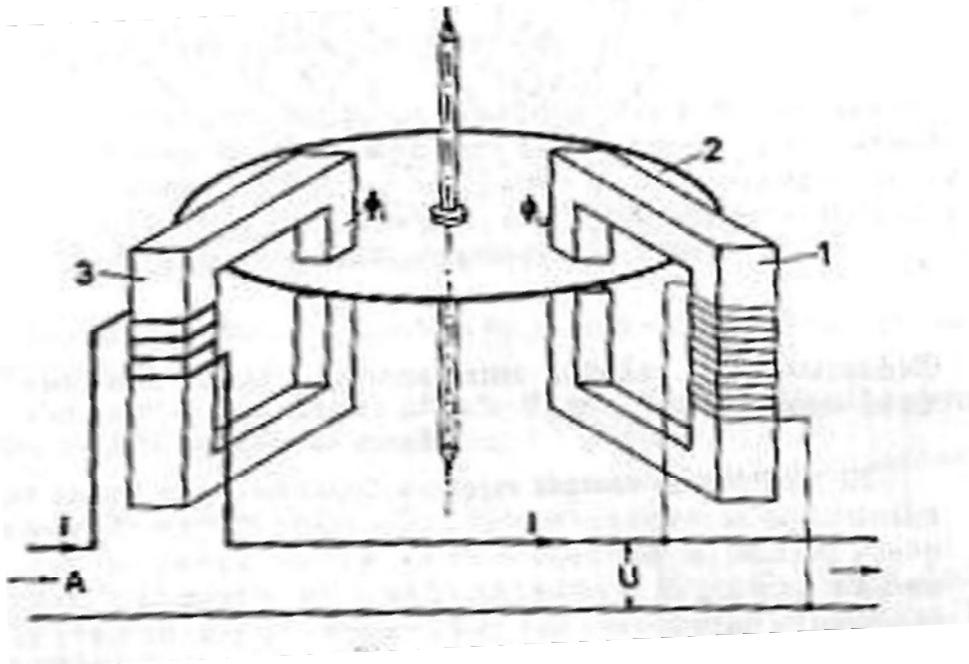
$$A_S = \int_{t_1}^{t_2} v * i * dt \quad (VAh); (kVAh); (MVAh)$$

Los medidores de energía se diferencian de los vatímetros por carecer su parte móvil de un dispositivo que origina un momento antagonista proporcional al ángulo de desviación. En su lugar el rotor de un medidor, que es de rotación continua como el rotor de un motor eléctrico, es frenado por el campo de un imán permanente, lo que origina un momento opuesto al momento propulsor del sistema motor y que es proporcional a la velocidad de rotación.

Las partes principales de un medidor de energía son: (A) el sistema motriz y (B) el sistema de frenado, los cuales actúan sobre el mismo rotor y a demás, (C) el numerador-integrador, el cual traduce las revoluciones efectuadas por el rotor durante un determinado tiempo, a la cantidad de unidades de energía consumida.

La figura 1 representa en forma esquemática el principio de construcción del sistema motriz. Este consta de dos electroimanes 1 y 3, con sus respectivos arrollamientos de tensión y de intensidad. El arrollamiento de tensión de muchas espiras y de muy alta inductancia está conectado a la tensión v de la red que alimenta el receptor y el otro, de pocas espiras de de muy bajas impedancia, esta intercalado en serie con el receptor. Ambos electroimanes abrazan el rotor 2, que es un disco de aluminio montado en un eje. El electroimán 1 conectado a la red origina un flujo magnético \varnothing_u proporcional a la tensión v , y el otro electroimán 3, por el cual se hace circular⁴ la corriente del consumidor, origina le flujo magnético \varnothing_i proporcional a dicha corriente. Ambos flujos (\varnothing_u y \varnothing_i) inducen en el disco las corrientes de Foucault (I_{Du} e I_{Di}). Las cuales, conjuntamente con los dos flujos, producen un par motor M_m proporcional a la potencia que se mide.

Figura 1. Construcción del sistema motriz



El sistema de frenado consiste en un fuerte imán permanente, que abraza el disco-rotor del sistema motriz. Durante la rotación del disco el flujo magnético del imán ϕ_{im} induce en él corrientes de Foucault y se produce un par de frenado M_f proporcional a la velocidad periférica del disco.

2.1. Deducción de la relación entre energía y las revoluciones en el tiempo

El medidor de energía eléctrica funciona de la forma siguiente: mientras no se consume energía, solo existe el flujo Φ_u y el medidor queda parado; al consumir energía aparece además el flujo Φ_i y el medidor se pone en marcha, impulsado por el momento motor M_m . Al principio, el movimiento del disco es lento y por lo tanto el par de frenado M_f es muy débil. A medida que la velocidad del disco va aumentando, también crece el par de frenado hasta que se establece el equilibrio entre los dos momentos de torsión M_m y M_f . Debido a la forma del imán de freno y a la construcción de su soporte, se puede influir sobre la velocidad del disco y obtener así una regulación muy precisa del número de revoluciones del rotor en un margen muy amplio.

Como se expone más adelante, el par motor M_m que actúa sobre el disco es proporcional a la potencia que se mide:

$$M_m = c_1 * P$$

Donde c_1 es una constante cuyo valor depende de las particularidades constructivas del sistema motor.

El momento torsional de freno M_f es proporcional a la velocidad periférica del disco:

$$M_f = C_2 * v$$

Donde C_2 es una constante cuyo valor depende del imán y de su posición respecto al disco y v es la velocidad uniforme cuando ambos pares _motor y de frenado_ son iguales. Pueden expresarse:

$$v = \frac{dl}{dt}$$

Donde $l = 2\pi n$ y significa el recorrido de un punto del disco cuya distancia del eje de rotación es igual a una unidad de longitud.

$$v = \frac{d(2\pi n)}{dt} = 2\pi \frac{dn}{dt}$$

De igualdad de momentos de torsión $M_m = M_F$ se deduce:

Para un periodo de medición desde t_1 hasta t_2 integramos ambos miembros entre t_1 y t_2 :

$$\int_{t_1}^{t_2} P * dt = C \int_{n_1}^{n_2} dn$$

El primer miembro de esta ecuación expresa el valor A de la energía medida y el segundo expresa el número de vueltas n del disco, efectuadas durante el periodo de medición, multiplicado por una constante C.

$$A = C * n$$

El número de vueltas del disco-rotor es proporcional a la cantidad de energía medida.

2.2. Constante

La constante C depende de la construcción del sistema motor y del mecanismo integrador-numerador y es por lo tanto una cifra característica para cada modelo de medidor. Se denomina constante del medidor y se la determina para las condiciones normalizadas del funcionamiento del medidor, o sea a una temperatura determinada y en una posición del medidor también determinada, con la carga nominal, etc.

El movimiento del rotor se transmite al integrador-numerador (figura 1) mediante un sistema de engranajes, que mueve agujas indicadoras o tambores con cifras. Este dispositivo está acoplado al eje del rotor y suma su número de vueltas. Como su indicación es proporcional al número de revoluciones efectuadas y este es proporcional a la energía A, la indicación del numerador resulta proporcional a la energía consumida. La relación de transmisión de las ruedas dentadas en el mecanismo integrador se calcula de modo que las indicaciones en cifras correspondan directamente a las unidades de energía eléctrica medida.

Debido a varios factores externos y/o a errores originados por el medidor mismo, el valor de su constante puede diferir del valor nominal C_N . En tal caso, el valor de la energía indicada por el medidor difiere de su valor real. El valor de este error está limitado por los reglamentos permitentes. El error δ en % del valor real se calcula:

$$\delta = \frac{A_{\text{ind}} - A_{\text{real}}}{A_{\text{real}}} * 100$$

Donde A_{ind} es el valor de la energía causada por el medidor, y A_{real} es el valor real de la energía consumida.

Error δ resulta positivo cuando el medidor acusa una energía mayor a la energía consumida realmente, y viceversa.

Como cuando se ha dicho, en la medición de la energía eléctrica (tanto en instalaciones monofásicas como polifásicas) se utilizan medidores cuyo funcionamiento está basado en el principio de instrumentos de inducción. En el capítulo presente se describe este sistema enfocándolo desde el punto de vista del medidor-contador de energía eléctrica. Como ya se puede apreciar, es un sistema de dos flujos sin dispositivo que origina el par antagonista. Esto permite la rotación continua del disco-rotor con registro se efectúa mediante un sistema de engranajes acoplado al eje de rotación del disco. La velocidad de rotación corresponde a la constante del numerador-integrador y se la puede ajustar mediante un imán permanente que actúa sobre una porción del disco. Además existen otras regulaciones, que se explican más adelante, y que se utilizan para varios tipos de carga.

El medidor de energía activa debe registrar, con cualquier tipo de carga (resistiva-inductiva, reactiva-capacitiva), la componente activa, $V * I * t * \cos\phi$. Para que se cumpla esta condición, es indispensable que el momento motor, que impulsa el disco y produce su rotación. Sea siempre proporcional al producto de los componentes activos de la tensión V y de la intensidad I .

2.3. La condición de 90°

Sobre el disco actúan dos momentos:

El momento M_1 que se produce por la acción recíproca entre el flujo Φ_u del electroimán de la tensión (1), y la corriente I_{Di} inducida en el disco por el flujo Φ_i del electroimán de intensidad (3) y el momento M_2 que se origina por el flujo Φ_i y la corriente inducida I_{pu} en disco por el flujo Φ_u .

La suma de ambos momentos da el momento resultante que hace girar el disco: $M_T = M_1 + M_2$

Para que el momento resultante M_T sea proporcional a la potencia activa se debe cumplir la condición:

$$\Psi = 90^\circ - \varphi$$

Donde Ψ es el ángulo entre los vectores de los flujos Φ_u y Φ_i , y φ es el ángulo de desfase entre la tensión V y la intensidad I del receptor. De esto surge que:

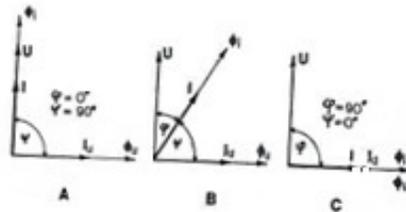
$$\text{sen } \Psi = \text{cos } \varphi$$

Debido al acoplamiento de los flujos magnéticos con las magnitudes medidas (V, I), cualquier variación del ángulo φ origina una igual variación del ángulo Ψ (figura 2). En consecuencia, cuando se consigue que, con el factor de potencia $\text{cos } \varphi = 1$, ambos flujos (Φ_u, Φ_i), estén desfasados exactamente 90°, el par motor o momento de tensión M_T será siempre proporcional a la potencia activa, cualquiera que sea el ángulo de desfase entre U e I . Se dice que el sistema motor del medidor debe ser contrastado a la "condición de 90°". La coincidencia de las posiciones de los vectores de los flujos magnéticos (Φ_u, Φ_i),

con las posiciones de los vectores de las respectivas intensidades magnetizantes (I_u , I), significa que se cumple la condición;

$$\text{sen } \Psi = \text{cos } \varphi$$

Figura 2. Variación del ángulo φ del diagrama vectorial del medidor



Esto sucede cuando la intensidad magnetizante I_u está desfasada en 90° con respecto a la tensión V y para que esto ocurra la bobina del electroimán de tensión (1) debe comportarse como una inductancia pura. En realidad el bobinado del electroimán de tensión es muy inductivo (núcleo ferro magnético, gran número de espiras) y debido a un entrehierro relativamente largo y a las pérdidas en hierro y en cobre, en la practica el máximo ángulo de desfase (Φ_u) entre U en I_u es de 70° . Además φ , debido a varios factores, los flujos Φ_u y Φ_i no están exactamente en fase con sus respectivas corrientes magnetizantes (I e I_u).

2.4. Diagrama vectorial

La figura 3 muestra un diagrama vectorial de un sistema primitivo (no corregido). En este diagrama aparecen las siguientes magnitudes representadas por sus respectivos vectores:

V –tensión de la red a la cual está conectada la bobina del electroimán de tensión (1) y el receptor;

I –intensidad de la corriente que circula por la bobina del electroimán de intensidad (3) y por el receptor;

I_u –intensidad de la corriente que circula por la bobina del electroimán de tensión ($I_u = \frac{V}{Z_u}$). Esta corriente debería estar desfasada 90° con respecto a la tensión U , pero debido a lo expuesto anteriormente $\Phi_u > 90^\circ$;

Φ_u –flujo magnético originado por el electroimán de tensión; al atravesar el disco, el flujo induce en él la fem de Foucault E_{pu} (90° con respecto a Φ_u), y las corrientes de torbellino I_{pu} ;

Φ_i –flujo magnético originado por el electroimán de intensidad; al atravesar el disco el flujo induce en él la fem de Foucault E_{pi} (90° con respecto a Φ_i), y las corrientes de torbellino I_{pi} ;

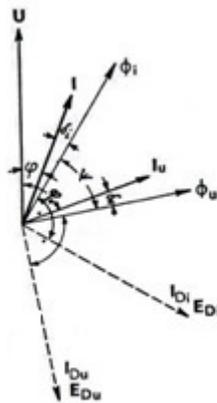
φ_i –ángulo de desfase entre la tensión U y la intensidad I del receptor (Cos Φ =factor de potencia del receptor);

φ_u –ángulo de desfase (interno) entre la tensión U y la intensidad I_u de la bobina de tensión

$\delta i, \delta u$ –ángulo de error de los flujos ϕ_i y ϕ_u . Con respecto a sus corrientes magnetizaste.

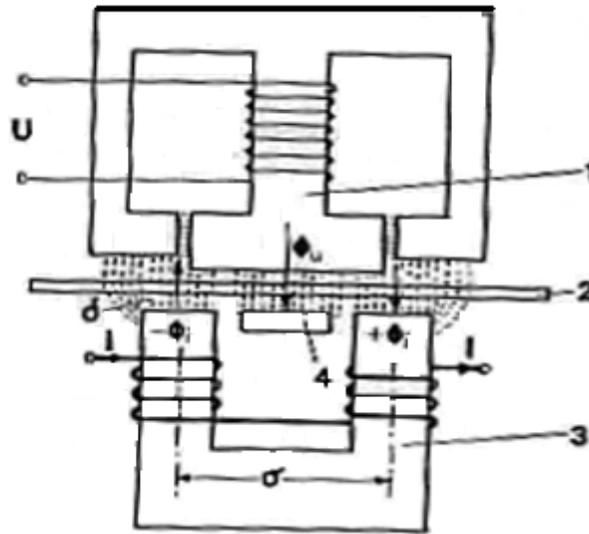
Ψ – Este ángulo debe ser de 90° cuando el ángulo de desfase ϕ es igual a cero y $\psi = 90^\circ - \phi$ con cualquier otro valor de ϕ (figura 3).

Figura 3. Digrama vectorial del medidor de energía eléctrica



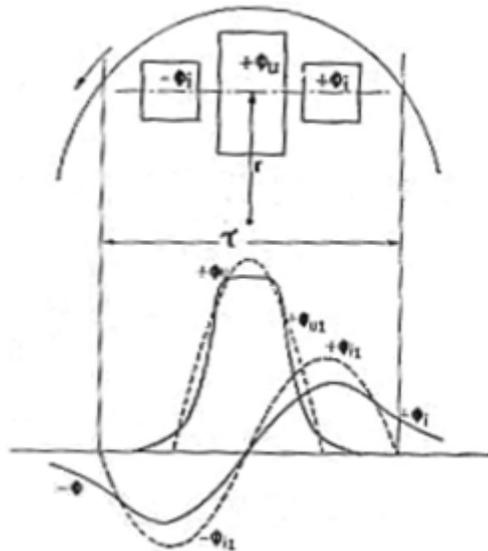
Para lograr la proporcionalidad de las indicaciones del medidor a la potencia activa, es imprescindible corregir los errores originados por el sistema motor que surge del análisis del diagrama vectorial de la figura 2-4. Los errores más importantes se deben al ángulo $\phi < 90^\circ$ y a los ángulos δu y δi , de las desfases entre los flujos y sus respectivas corrientes magnetizaste (I e I_u). Más adelante, se estudian los métodos y dispositivos de corrección que se emplean.

Figura 4. Forma del equipo motor de un medidor de energía eléctrica



La figura 4 muestra la forma aproximada del equipo motor de un medidor marca AEG. Esta forma es típica para la mayoría de los medidores de energía de distintas marcas. Las diferencias existen únicamente en las dimensiones de los entrehierros y en la forma de los polos. Como se puede apreciar en la figura, los flujos de tensión Φ_u y de tensión Φ_i están señalados por separado pero ambos actúan en conjunto en la formación de las características del circuito. Los símbolos Φ_u y Φ_i significan los componentes activos de los flujos que atraviesan el disco y que inducen en él las corrientes de Foucault que originan el par motor. Las cifras tienen el mismo significado que en la figura 1.

Figura 5. Significa que existen tres momentos parciales



2.5. Momento o par motor

Para determinar el par o momento motor del sistema se parte de la ecuación básica del instrumento de inducción de dos flujos:

$$M_T = C * f * \phi_u * \phi_i * \widehat{\text{sen} \phi_u, \phi_i}$$

Donde ϕ_u y ϕ_i son dos flujos magnéticos que atraviesan el disco-rotor y que están desfasados, f es la frecuencia de los flujos y C es la constante que depende de la construcción del medidor.

El disco rotor dos (2) del medidor está atravesado por los tres flujos magnéticos: $+\phi_u$; $+\phi_i$ y también $-\phi_i$ (figura 5), lo que significa que existen tres momentos parciales.

$$M_1 = C_1 * f * \phi_u * \phi_i * \widehat{\text{sen} \phi_u, \phi_i}$$

$$M_2 = C_2 * f * \phi_u * (-\phi_i) * \widehat{\text{sen} \phi_u, -\phi_i}$$

$$M_3 = C_3 * f * \phi_i * (-\phi_i) * \widehat{\text{sen} \phi_i, -\phi_i}$$

Los momentos actúan en la dirección desde el flujo adelantado hacia el flujo atrasado. El ángulo de desfase entre ϕ_i y $-\phi_i$ es de 180° de modo que $\widehat{\text{sen}(\phi_i, -\phi_i)} = \widehat{\text{sen} 180^\circ} = 0$. En consecuencia, $M_3 = 0$. Los dos momentos restantes M_1 y M_2 se suman originando el momento resultante M_T que impulsa el disco.

$$M_T = M_1 + M_2$$

Sustituyendo tenemos:

$$M_T = C_1 * f * \phi_u * \phi_i * \widehat{\text{sen} \phi_u, \phi_i} + C_2 * f * \phi_u * (-\phi_i) * \widehat{\text{sen} \phi_u, -\phi_i}$$

Suponiendo que el ángulo entre los flujo ϕ_u y $\phi_i < \phi_u, \phi_i = \Psi$

Finalmente se obtiene:

$$M_T = C * f * \phi_u * \phi_i \text{sen} \Psi$$

Para simplificar se admite que a la función $\phi = f(I)$ es lineal, de modo que:

$$\phi_i = K_i * I$$

También se considera que:

$$\phi_u = k_u * I_u$$

Donde $I_u = \frac{U}{Z_u}$ y Z_u es la impedancia de la bobina del electroimán de tensión. Por ser la resistencia activa del arrollamiento muy pequeña en comparación con la resistencia reactiva ($R \ll L_w$) se puede considerar:

$$Z_u = 2\pi * f * l$$

Y sustituyendo se tiene:

$$\phi_u = k_u * I_u = k_u \frac{U}{Z_u} = \frac{k_u * U}{2\pi * f * l}$$

Sustituyendo los valores de ϕ_i y ϕ_u en la ecuación del par motor se obtiene:

$$M_T = C * f * \frac{k_u * U}{2\pi * f * l} * K_i * I * \text{sen}\Psi = C_N * U * I * \text{sen}\Psi$$

Como ya se ha exceptuado anteriormente, la condición para que el par motor sea proporcional a la potencia activa es:

$$\Psi = 90^\circ - \varphi$$

$$M_T = C_N * U * I * \text{sen}90^\circ - \varphi = C_N * U * I * \text{cos}\Psi$$

Para que el ángulo ψ sea realmente igual a $90^\circ - \varphi$ se emplean artificios con el fin de poder ajustar el ángulo entre \varnothing_i y \varnothing_u . Esto se consigue bifurcando el flujo total \varnothing_{ut} , producido por la bobina de tensión, en dos partes: en un flujo derivado o flujo shunt \varnothing_{sh} y en un flujo activo \varnothing_u , que atraviesa el disco-rotor. En el ejemplo de la figura 5 al flujo shunt \varnothing_{sh} está dividido en dos partes iguales. Debido a la construcción del medidor tomado como ejemplo: de esto resulta:

$$\phi_{uT} = \phi_u - \phi_{sh}$$

La figura 5b muestra el diagrama vectorial en el cual se puede apreciar la corrección del flujo producido por la bobina de tensión. Se supone una carga reactiva que origina el desfase del ángulo φ entre la tensión U y la corriente I y con un ángulo δ_i entre I y \varnothing_i . Debido a las pérdidas en el hierro y el cobre, el ángulo entre la tensión U y la corriente I_u en la bobina de tensión será $<90^\circ$. Con respecto a esta corriente I_u el flujo shunt \varnothing_{ush} acusa un retraso relativamente pequeño, mientras el flujo \varnothing_u está cargado; además, con las corrientes inducidas en el disco su retraso con respecto a I_u es mayor. La suma geométrica de estos dos flujos es igual a \varnothing_{uT} . Del diagrama se deduce que para cumplir la condición $\Psi = 90 - \varphi$ el ángulo entre la tensión U y el flujo \varnothing_u debe ser $90 - \varphi$ es decir, $>90^\circ$.

Los retrasos de los flujos parciales \varnothing_u y \varnothing_{ush} con respecto a la corriente I_u pueden ser regulados colocando espiras en cortocircuito (6 en la fig. 6a) que hacen aumentar el ángulo entre I_u y \varnothing_{ush} , disminuyendo así el ángulo Ψ . También se obtiene una regulación de este ángulo variando el entrehierro del círculo magnético shunt. Los medios de regulación descritos pueden ser

empleados por separado o bien combinados y sirven para el ajuste del medidor. Se consigue un ajuste fino con unas espiras (7) sobre el núcleo del electroimán de intensidad y una resistencia variable (R) (figura 6a). Con ello se regula el ángulo δ_i y el flujo ϕ_i . También se utiliza un shunt magnético (5) en el núcleo del electroimán de intensidad.

2.6. Momentos o pares de frenado

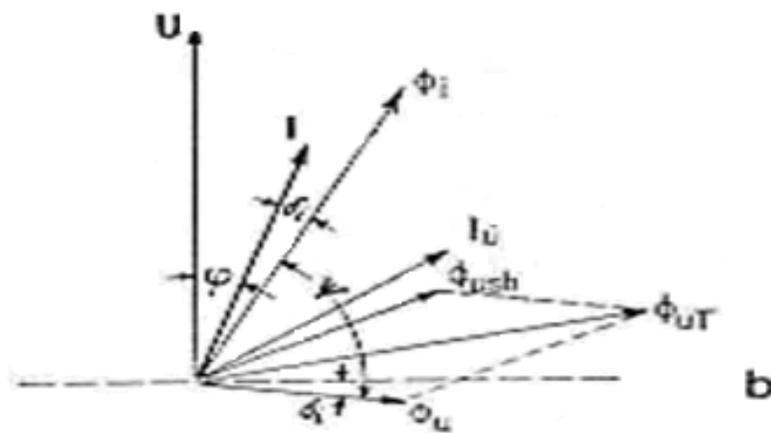
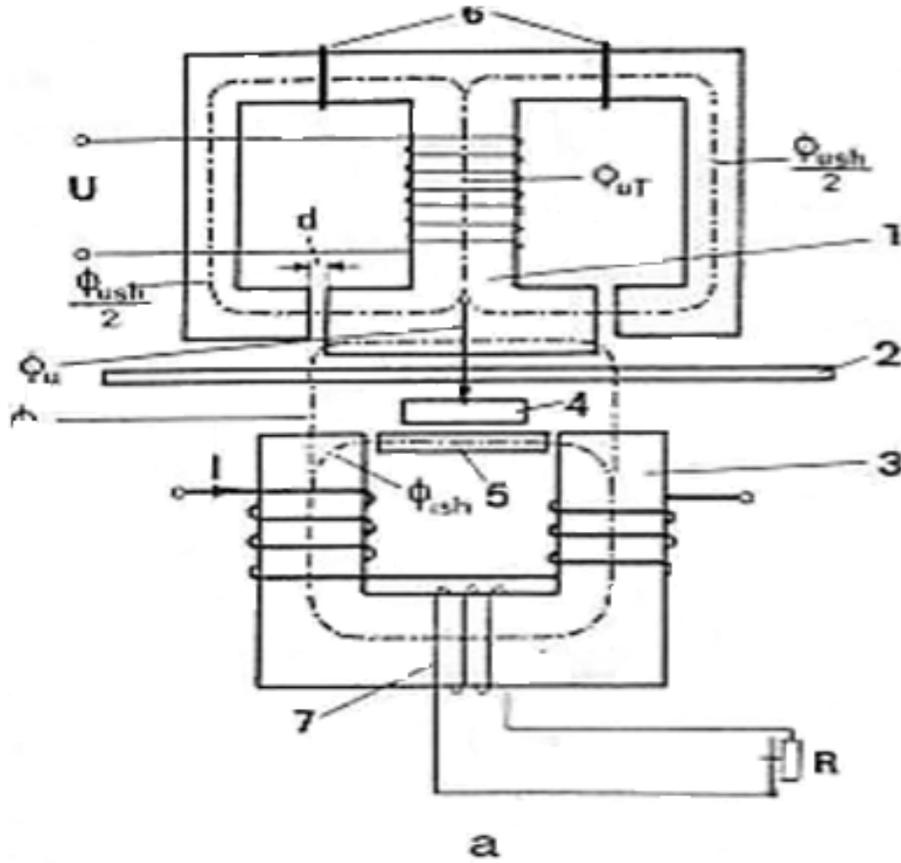
Cuando el medidor está en marcha, el par motor, M_r , está equilibrado por el momento de frenado M_f , el cual proviene principalmente del imán de freno. Además, se originan otros momentos de frenado eléctrico adicionales, debido a los flujos de tensión ϕ_u y de intensidad ϕ_i . Finalmente, se debe tener en cuenta un pequeño frenado originado por fricción en algunas partes móviles del medidor (cojinetes y numerador). En consecuencia, el frenado total se debe a la suma de todos estos momentos parciales:

$$M_F = M_{F,im} + M_{F,i} + M_{F,u} + M_{F,fr}$$

El momento de frenado $M_{f, im}$ del imán de freno (2) en la figura 7 depende de su flujo ϕ_{im} y de la velocidad del disco (1) en la zona de influencia del imán. Al girar el disco (1) se genera en él una fuerza electromotriz E_D , que provoca una corriente de Foucault I_D es proporcional al flujo del imán ϕ_{im} y a la velocidad del disco v .

$$E_D = c_1 * \phi_{im} * v$$

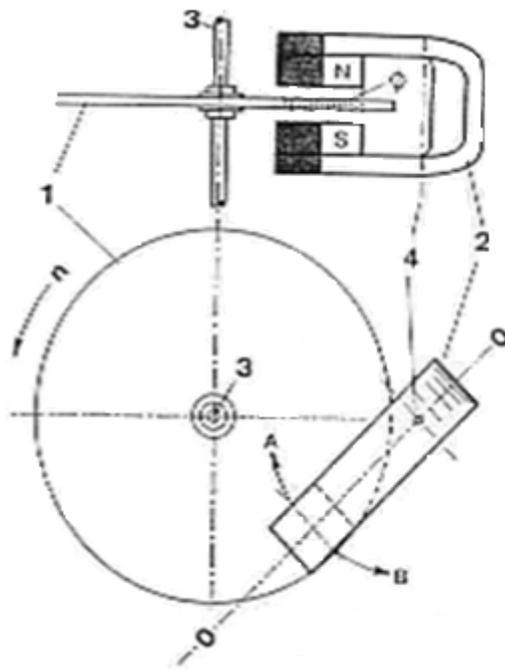
Figura 6. Flujo shunt está dividido en dos partes



Donde C_1 es una constante que depende de las características constructivas del medidor. La corriente de Foucault es proporcional a la fem E_D :

$$I_D = C_2 * E_2 = C_1 C_2 * \phi_{im} * v$$

Figura 7. Momentos de freno



Esta corriente origina con el flujo ϕ_{im} un momento torsional en el disco, opuesto al sentido de rotación:

$$M_{F,im} = C_3 * I_D * \phi_{im} = C_1 C_2 C_3 * \phi_{im}^2 * v$$

$$M_{F,im} = C_4 * \phi_{im}^2 * v$$

Con una determinada potencia constante, el par motor M_r es igual al momento de frenado total M_f siendo uniforme la velocidad angular del disco. El momento de frenado depende de la posición del imán, es decir, de la velocidad de la porción del disco abarcada por él y, por consiguiente, moviendo el imán, se puede variar el momento del frenado $M_{F,im}$ y con ello la velocidad angular del disco, si que varié la potencia medida.

En la figura 7 el imán está colocado en la posición 0-0, que corresponde al máximo valor del momento de frenado $M_{F,im}$. Al desplazar el imán girándolo alrededor del punto 4 en el sentido señalado por la flecha A, disminuye el frenado debido a la disminución de la velocidad de desplazamiento de la porción del disco abarcadas por los polos del imán. También se puede disminuir el momento del frenado desplazando el imán en el sentido señalado por la flecha B, debido a la disminución de la superficie de los polos que actúa sobre el disco. En los medidores de energía, se utiliza para la regulación del desplazamiento el imán en el sentido señalado por la flecha A.

Los momentos de frenado adicionales $M_{F,u}$ y $M_{F,i}$ dependen de la tensión v y de la intensidad I respectivamente. Por esto, el momento $M_{F,u}$ solo varia con la velocidad v ya que la tensión v y el flujo ϕ_u son por lo general constantes, mientras que el momento $M_{F,i}$ varia además con la intensidad de corriente de carga I . Debido a esta se puede producir un frenado excesivo con cargas grandes. Este frenado adicional se corrige automáticamente con un shunt magnético (5 en fig. 6-a) para el flujo magnético ϕ_i . Con intensidades cuyo valor no sobrepasa el valor nominal, el flujo ϕ_i que traspasa el disco (2) es

proporcional del flujo total Φ_T y a la corriente I . con grandes intensidades, el shunt (5) queda saturado y el flujo Φ_i crece más de lo que corresponde. De este modo se compensa el aumento del momento de frenado M_{F_i} .

El momento de frenado $M_{F_{fr}}$ originado por las fricciones mecánicas es aproximadamente constante y su influencia en el valor del error es importante cuando el medidor funciona con una fracción de su potencia nominal. Cuando ya se ha mencionado, el momento $M_{F_{fr}}$ depende de la construcción y del estado de los cojinetes y el engranaje del numerador. También depende este momento de la temperatura ambiente, de la posición del medidor y de la velocidad del disco-rotor.

Para compensar los errores originados por la fricción, especialmente con cargas pequeñas en las que además se hace notar la falta de linealidad de la curva de permeabilidad del material del núcleo del electroimán de intensidad, se crea un pequeño momento motor adicional utilizando uno de los procedimientos que muestra la figura 8, en la que a es un tornillo en el polo del electroimán de tensión; b muestra una chapita de cobre atravesada por una fracción del flujo Φ_u ; c es un entrehierro desigual d es un trozo de acero de baja saturación, colocado cerca del polo.

Todos estos elementos, aplicados uno el polo del electroimán de tensión, cuyo flujo Φ_u es constante, dividen este flujo y originan así un pequeño par motor constante, cuya influencia solo es apreciable cuando el medidor funciona con cargas pequeñas, es decir, con un momento M_T relativamente débil.

2.7. Influencia de las variaciones de los parámetros

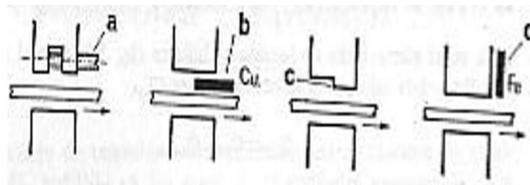
Como ya se ha expuesto, el momento total del frenado es la suma de cuatro parciales, de los cuales el momento principal $M_{F, im}$ es proporcional al número de revoluciones del disco y, una vez ajustado el imán en su posición correcta, no presenta dificultades durante el funcionamiento normal del medidor. La calidad principal que se exige de este imán es que no envejezca, es decir, que su flujo magnético sea constante en el tiempo y al estar sometido a influencias exteriores varié lo mínimo posible.

De los tres momentos de frenado restantes, dos pueden influir considerablemente en la exactitud de las indicaciones del medidor: el momento de fricción $M_{F, fr}$ y el momento $M_{F,i}$, producido por el flujo \emptyset_i . Este momento aumenta cuadráticamente en el flujo \emptyset_i y resulta excesivo con corrientes mayores que las nominales del medidor. Ya se ha expuesto como se consigue compensar, hasta cierto límite, los errores originados por el aumento de este flujo.

El momento $M_{F, fr}$ en cambio, es constante y su influencia se hace notar con muy bajas intensidades cuando el momento motor M_T es el valor comparable con el valor del momento $M_{F, fr}$. Como se ha visto, el momento $M_{F,fr}$ puede ser compensado, por un momento motor adicional, que depende del flujo \emptyset_u . Este momento adicional no debe ser tan grande que el disco gire vacío en el caso de sobretensión. Generalmente, la reglamentación oficial exige que un aumento de la tensión nominal (15 a 20% según las normas aplicadas en cada país), no haga girar el disco, estando el circuito de intensidad desconectado.

Cuando el medidor funciona a una fracción de su potencia nominal, el flujo \varnothing_i resulta demasiado pequeño en comparación con el flujo \varnothing_u que se produce cuando el medidor funciona con su potencia nominal. Esto origina errores negativos. El momento motor adicional, que contrarresta los efectos del frenado por fricción (figura 8), también actúa en el sentido de corregir los errores originados por el electroimán de intensidad.

Figura 8. Polos del electroimán de intensidad



Teóricamente las indicaciones del medidor deben ser proporcionales a la tensión de la red aun cuando esta no sea constante. En realidad la tensión varia siempre, pero la influencia de estas variaciones es despreciable mientras las variaciones de la tensión se mantengan dentro de los límites establecidos ($\pm 10\%$). El aumento de la tensión hace aumentar el flujo \varnothing_u y con ello el aumento de torsión o par motor, pero en mayor cuantía aumenta también el momento de frenado $M_{F, u}$ (por ser proporcional el cuadrante del flujo \varnothing_u) y el medidor registra menos energía de la que en realidad se consume; en el caso de una disminución de la tensión, el medidor registra más energía de la consumida.

Las variaciones de la frecuencia tienen poca influencia sobre las indicaciones de los medidores cuando estos se conectan en las redes de frecuencia constante. El par motor

$$M_T = C * f * \phi_u * \phi_i * \cos\Psi$$

Donde el flujo de tensión ϕ_u es inversamente proporcional a la frecuencia y, en consecuencia el producto $f \cdot \phi_u$ queda constante. Los errores originados son positivos con frecuencias superiores a la nominal y negativos con frecuencias inferiores.

La elevación de la temperatura aumenta la resistividad y, en consecuencia, la resistencia de los conductores y del disco. La mayor influencia de la temperatura es la que ejerce sobre el flujo del imán de freno. Con mayor temperatura disminuye su flujo, en grado que depende del tipo de aleación del imán. En consecuencia, debido al aumento de la resistencia del arrollamiento de tensión y de la resistencia del disco y la disminución del momento de frenado, se origina un error negativo que se compensa por medio de un pequeño shunt magnético, cuya permeabilidad varia de modo inversamente proporcional a la temperatura. Si la temperatura aumenta 10° C, el flujo del imán permanente disminuye alrededor de 0,3%. Por ser el momento de frenado $M_{F, im}$ proporcional al cuadrado del flujo, el momento de frenado disminuye en 0,6% aproximadamente. En consecuencia el disco gira con un aumento de 0,6% del número de sus revoluciones, lo que produce un error positivo del correspondiente valor.

2.8. Partes componentes

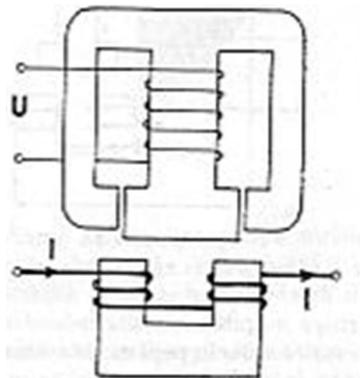
Las principales partes componentes de un medidor de energía se dividen según su función en el sistema, de modo que se tiene:

- Partes del sistema motor (estator)
- Rotor y cojinetes
- Imán de freno
- Mecanismo numerador-integrador

2.8.1. Partes del sistema motor

El estator del sistema motor está compuesto por el núcleo de electroimán de intensidad y por el núcleo de electroimán de tensión. Según la marca y el modelo del medidor, estos dos elementos están construidos por separado o forman una sola pieza. La figura 10 y la figura 11 muestran los núcleos de ambos electroimanes construidos por separado (AEG y FUJI) y las figuras 12 y 13, muestran los núcleos de una sola pieza (GENERAL ELECTRIC Y UHER), respectivamente.

Figura 9. Núcleo del electroimán de tensión (AEG)



El material que se utiliza para la confección de núcleos es laminación de chapa magnética de alta inducción magnética y de permeabilidad lo más constante posible.

Figura 10. Núcleo del electroimán de tensión (FUJI)

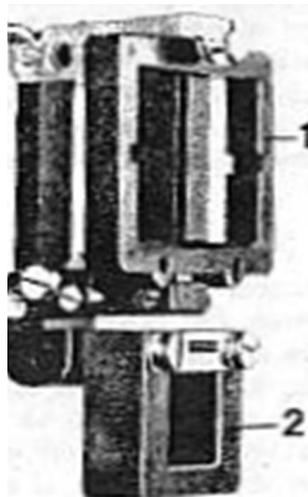


Figura 11. Núcleo de electroimán de una sola pieza general electric

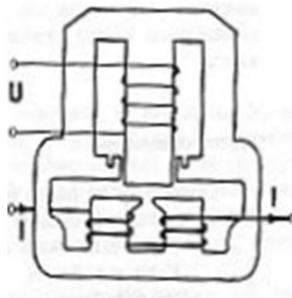
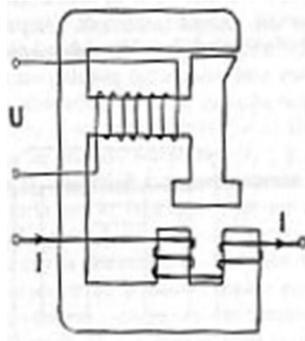


Figura 12. Núcleo de electroimán de una sola pieza UHER



Esta última característica tiene una gran importancia, ya que condiciona el cumplimiento de $\frac{\phi}{I} \approx \text{constante}$ en el electroimán de intensidad. En un núcleo magnético cerrado (sin entrehierro) esta condición se cumple únicamente en la parte recta de la curva de histéresis. El entrehierro, relativamente largo, que contiene el núcleo de los electroimanes del medidor es causa de alargamiento de la parte recta de la correspondiente curva de magnetización. Debido a la construcción especial de los electroimanes del sistema motor, se obtiene la relación $\frac{\phi}{I} \approx \text{constante}$, dentro del alcance de medición del medidor de energía.

Lo expuesto es también válido para el electroimán de tensión en el cual se requiere que $\frac{\phi}{U}$ sea constante. El flujo total ϕ_{uT} generado en el electroimán de tensión se bifurca (figura 6) en el flujo ϕ_u y el flujo derivado por el shunt magnético ϕ_{ush} .

$$\phi_{ut} = \phi_u + \phi_{ush}$$

Para que el flujo ϕ_u , que actúa sobre el disco, sea también proporcional a la tensión U , se requiere que $\frac{\phi_u}{I_u}$ constante, lo cual se consigue utilizando uno de los sistemas representados en la figura 8.

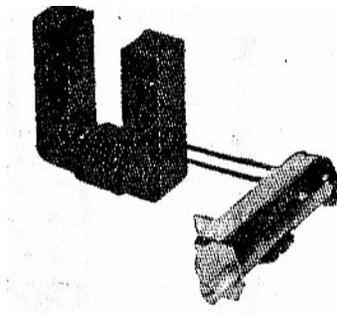
Sobre los núcleos de los electroimanes de tensión y de intensidad están colocadas las bobinas de tensión y de intensidad respectivamente. La bobina de tensión, colocada sobre su respectivo núcleo, debe caracterizarse por una gran independencia. Como se haya explicado anteriormente es imprescindible que este electroimán tenga la impedancia totalmente inductiva, o sea que la intensidad de corriente I_u que circula por la bobina quede desfasada 90° con respecto a la tensión de la red aplicada v . Esto no sucede debido a que la bobina tiene un gran número de espiras y, por tanto, una considerable resistencia óhmica (entre 300 y 600 Ω). Esta resistencia depende del modelo, marca y tensión nominal del medidor. El máximo desfase que se consigue entre la tensión U y la corriente magnetizante I_u en este electroimán es del orden de 80° . El desfase adicional para que se completen los 90° requeridos se obtienen con dispositivos adicionales que se explican a continuación. También, debido a que la bobina de tensión está conectada permanentemente a la red, es de mucha importancia que la potencia que disipa sea lo menor posible.

Por lo general, las bobinas de tensión de los medidores disipan 1 W por cada 100 V de la tensión nominal. Sin y con núcleo, de un medidor marca AEG. Sobre el núcleo del electroimán de intensidad está colocado el arrollamiento de intensidad confeccionado con el alambre de cobre esmaltado, perfilado en los casos de intensidades mayores de 10A. Su sección está sobredimensionada para disminuir la disipación de potencia de esta bobina. La potencia disipada también varia con la marca, modelo y la intensidad nominal del medidor. Tomando como ejemplo los datos de un medidor monofásico de marca G.E.C. (Inglaterra), se ve que las perdidas por la potencia disparada en las bobinas de intensidad no sobrepasan 6,30 W, como valor medio.

Para los ajustes finales y exactos del desfase de 90° entre los flujos magnéticos Φ_u y Φ_i , lo que teóricamente equivale al ajuste de desfase entre la tensión U y la corriente magnetizante I_u , se utilizan varios métodos. Del análisis del diagrama vectorial de la figura 3 se deducen varios medios de obtención del ángulo $\Psi=90^\circ$. Una posibilidad es operar en el circuito magnético del electroimán de intensidad o en ambos. A continuación se mencionan los métodos más frecuentemente usados:

1. Espiras en cortocircuito sobre la parte que actúa como shunt magnético sobre el núcleo del electroimán de tensión (6 en la figura 6).
2. Algunas espiras colocadas sobre el núcleo del electroimán de tensión cortocircuitada por una resistencia regulable.
3. Regulación del entrehierro d del shunt magnético del núcleo del electroimán de tensión (figs. 9, 11 y 12).
4. Bobina de pocas espiras colocadas sobre el núcleo del electroimán de intensidad, cortocircuitada por una resistencia variable (7 en fig. 6 y fig. 15).

Figura 14. Regulación mediante un shunt magnético



5. Regulación mediante un shunt magnético variable entre los polos del núcleo del electroimán de intensidad (5 en figura 13).
6. Una chapita regulable de cobre introducido en el entrehierro (figura 8b).
7. La figura 8b muestra varios ejemplos del sistema motor completo (núcleo con bobinas de tensión y de intensidad colocadas), utilizados en la fabricación de medidores de energía por las siguientes firmas: a, b: AEG (Alemania); c, d: DANUBIA ZÄHLER (Austria); e: SANGAMO (Canadá).

2.8.2. Rotor y cojinetes

El rotor es un disco de aluminio que gira a bajo número de revoluciones por minuto. La velocidad nominal de giro del rotor del medidor es el número de revoluciones por minuto del disco al aplicar el medidor de tensión U nominal, la intensidad de corriente I nominal y el factor de potencia del receptor $\cos\phi = 1$. Es obvio que la velocidad de giro será inferior a la nominal cuando los valores de los parámetros enumerados sean inferiores a los nominales. Para la orientación del lector, la tabla a continuación contiene las velocidades nominales y los pesos de los rotores en distintas marcas de los medidores monofásicos.

El disco (1), fig. 14 y 15 a estampado es una chapa de aluminio de espesor mayor de 1,5 mm. Esta fijación sobre el eje provisto del sin fin (2) que engrana en el numerador. El sin fin puede ser postizo y de material plástico o fresado sobre el mismo eje. En la mayoría de los medidores el disco tiene

estampada sobre su circunferencia una escala que tiene la finalidad de facilitar el contraste del medidor en serie. En medidores polifásicos se utilizan 2 o 3 discos colocados sobre el mismo eje (fig. 16). Los momentos motor originados por el sistema de cada fase se suman actuando sobre el mismo eje.

Tabla I. Velocidades nominales y pesos de los rotores de distintas marcas.

	Velocidad nominal de giro en varios modelos (rpm)	Peso neto del rotor (g)
AEG, Alemania	17.1 a 54.6	20
DANUBIA, Austria	8.8 a 27.5	22
THE ENGLISH ELECTRIC, Inglaterra	12 a 19	19.7 a 22.8
GENERAL ELECTRIC U.S.A	8.5	—
FUJI ELECTRIC CO. LTD Japan	54 a 66	18.8
METRONEX-PAFAL Polonia	12 a 16	25
SANGAMO, Canadá	9	18.4
UHER Austria	28	18

En el caso de un momentáneo aumento de la tensión de la red el dispositivo de compensación del momento de fricción (figura 8), puede producir el movimiento del rotor (muy lento), a pesar de que no circula carga alguna. Para compensar este defecto, algunos de los medidores están provistos de un

dispositivo adicional que consiste en una lengüeta de alambre o de lámina de hierro (3, figura 16), fijada al eje del rotor (1). Otra lengüeta (4) está fijada sobre el núcleo (6) del electroimán de tensión y es excitada por el flujo Φ_{UT} originado por la bobina de tensión (5). El disco, al girar muy despacio, acerca la lengüeta móvil (3) a la lengüeta fija (4) y por la mutua atracción entre ambas se detiene. La lengüeta fija así una posición determinada de paro al rotor.

Figura 14. Chapa de aluminio de 1.5mm de espesor

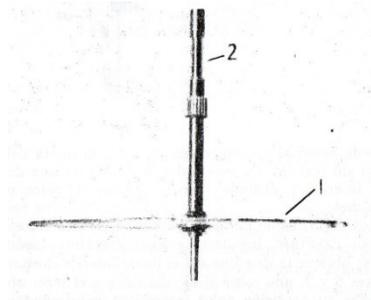


Figura 15. Chapa de aluminio con tornillo sin fin

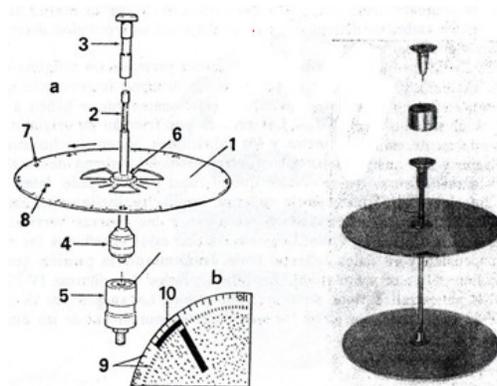
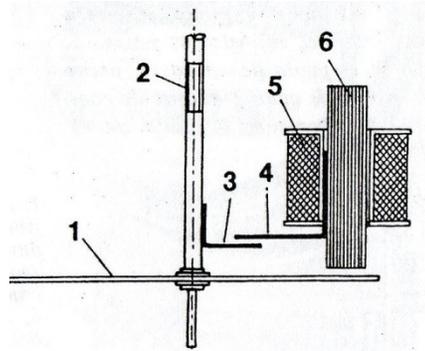


Figura 16. Tornillo sin fin



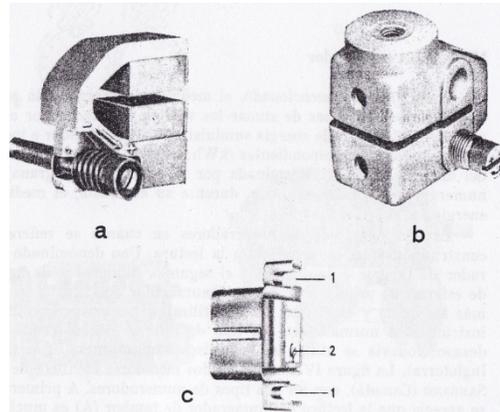
El medidor funciona durante largos periodos sin ninguna clase de mantenimiento y por lo tanto, es de máxima importancia que con el tiempo no aumenten los errores adicionales que se deben a la fricción en el sistema (M_{fr}). Los errores por fricción se origina principalmente en los cojinetes y los fabricantes ponen mucho esmero en su diseño y su construcción. Del análisis del sistema desde el punto de vista mecánico se deduce que el rotor está apoyado sobre el cojinete inferior y el cojinete superior impide inclinación. En consecuencia, el cojinete inferior reacciona a las fuerzas verticales y el superior a las laterales. Con este criterio están diseñados los sistemas de suspensión y en todos se trata de disminuir la presión que ejerce la presión del rotor sobre el cojinete inferior. La suspensión es la típica de los medidores monofásicos (de un disco), en los cuales el peso del rotor es reducido. Existen variantes, según la marca, pero en todo el eje del rotor descansa sobre una esfera en el cojinete inferior. Los cojinetes con la suspensión magnética. Los cojinetes de la figura 6 son los utilizados por la firma AEG en los medidores trifásicos. El cojinete superior 1 contiene un imán anular (3) que tiende a levantar la arandela (4) de material no remanente, fijada a la punta del eje del (con el sin fin) (5). La acción del imán origina una descarga del cojinete inferior 2, disminuyendo la presión del rotor sobre la esfera del cojinete.

Los cojinetes son los utilizados por las firmas ENGLISH ELECTRIC, Inglaterra y FUJI ELECTRIC, Japón. En este sistema se obtiene la descarga del cojinete inferior mediante de dos imanes anulares 6 y 7, uno sobre el eje del rotor y el otro sobre el cojinete, colocados en posición polar (repulsión) y formando de este modo una “almohada magnética”.

2.9. Imán de Freno

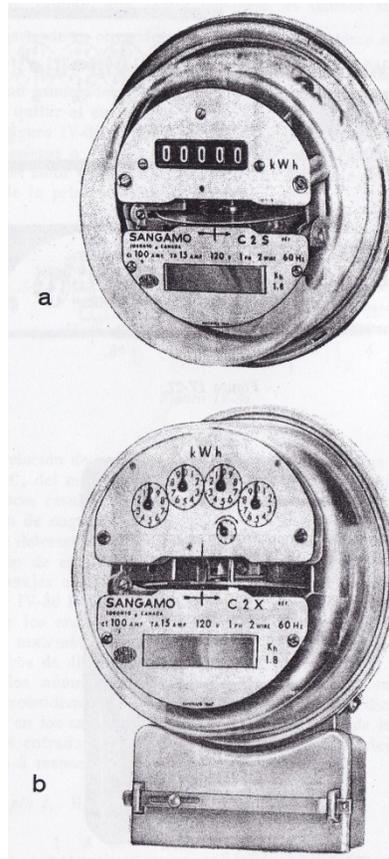
El imán de freno es uno de los elementos más importantes del sistema de ajuste del medidor. De su posición y de la estabilidad de su flujo magnético depende el error principal del medidor; por lo tanto es muy importante que cumpla con unas determinadas características, a saber: alta estabilidad magnética, gran fuerza coercitiva y mínima sensibilidad a los cambios de temperatura. Se debe tener en cuenta la influencia de los campos magnéticos externos al imán, existentes dentro del sistema del medidor. Los núcleos de los imanes tienen una sección longitudinal en forma de U (figura 17). Se los fabrica de las aleaciones de alnico, ya que este grupo de materiales se caracteriza por la estabilidad y fuerza coercitiva altas. Para la compensación de la influencia de temperatura, algunas firmas proveen al imán en su parte frontal de una placa de material magnético como un shunt magnético ajustable.

Figura 17. Imán de freno tipo U de los medidores de energía eléctrica



El shunt magnético está confeccionado una aleación cuya capacidad de conducción térmica disminuye con mayor con el aumento de temperatura que el material del imán. De este modo la pérdida de flujo del imán de freno, que se presenta en temperaturas más elevadas, es compensada por el flujo del shunt.

Figura 18. Medidores de energía eléctrica



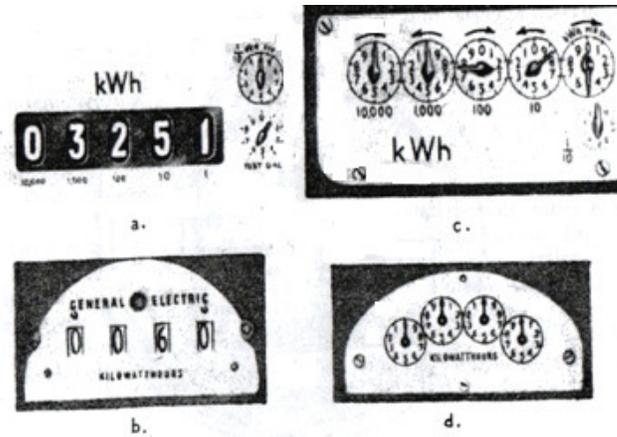
Algunos medidores tiene colocada entre el imán del freno y la bobina de intensidad una pantalla magnética confeccionada de chapa de material de poca remanencia. Esta pantalla tiene la finalidad de proteger el imán contra el flujo magnético de la bobina de intensidad, lo que es especialmente importante en los casos de cortocircuitos o sobrecargas en la red. La pantalla impide la penetración de líneas magnéticas de la bobina de intensidad en el imán de freno.

2.10. Mecanismo registrador

Como ya se ha mencionado, el medidor de energía está provisto de un dispositivo capaz de sumar las vueltas efectuadas por el disco proporcionalmente a la energía suministrada al consumidor e indicar las unidades correspondientes (kWh; MWh). La constante nominal del medidor C_N está determinada por la relación de engranajes del numerador, y a ésta se ajusta, durante su contraste, el medidor de energía.

Existen dos tipos de numeradores en cuanto se refiere a su construcción y en consecuencia a la lectura. Uno de nominado numerador de tambor o de disparo y el segundo, numerador de agujas o de esferas. El primer tipo está entrando ya en desuso; todavía se utiliza en los países anglosajones (USA, Canadá, Inglaterra). La figura 18 muestra dos medidores idénticos de marca SANGAMO (Canadá), con los dos tipos de numeradores. A primera vista se aprecia que la lectura del numerador de tambor (A) es mucho más rápida y cómoda; en cambio, la lectura del medidor (B) es más complicada. Al efectuar la lectura de este último hay que tener en cuenta que las agujas de distintas esferas giran en sentido contrario (tal como lo indican las flechas en la figura 19c) característica que se presta para cometer errores. La única ventaja del numerador de esferas sobre el numerador de tambor es que su momento de fricción es de valor muy pequeño. La figura 19 muestra distintos tipos de cuadrantes donde los ejemplos a y b pertenecen a los numeradores de tambor y los de las figuras c y d, a los numeradores de esferas. La figura 20 muestra un medidor monofásico marca AEH, provisto de un numerador de tambor.

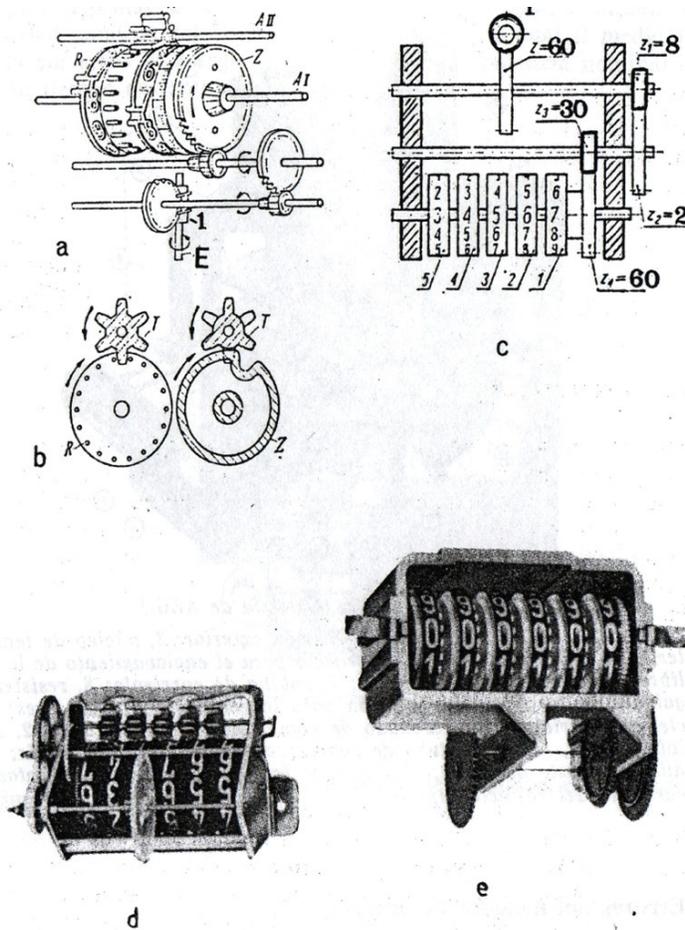
Figura 19. Lectura de datos de los medidores de energía eléctrica



La figura 20 muestra la construcción del registrador del tipo de tambor o de disparo. Se puede apreciar en la figura 20 al tren de engranajes que intervienen entre el sub fin (1) colocado sobre el eje (E) del rotor del medidor y el juego de tambores. En la figura 20 se presenta el juego de 5 tambores, o sea de 5 dígitos que se observan durante la lectura. Sobre la circunferencia de cada uno de los tambores están grabadas cifras desde 0 a 9. Al realizar el primer

tambor una vuela completa, el tambor siguiente salta por 1/10 parte de su circunferencia (disparo). El sistema se puede apreciar en la figura 20b. La figura 20d muestra la vista posterior de un numerador y la 20e un numerador visto de frente después de quitar el cuadrante.

Figura 20. Construcción interna del medidor tipo esfera

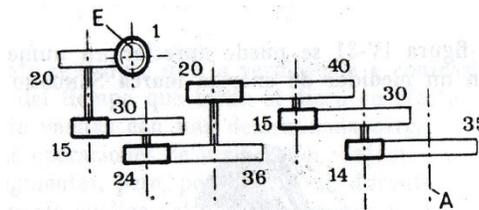


La figura 21 muestra el tren de engranajes del numerador de tipo de esfera o agujas. Con la letra “E” está señalada la posición del eje del rotor y el sin fin y con la letra “A” el eje de la aguja indicadora de la primera esfera.

La relación de engranajes del numerador determina la constante nominal C_N del medidor de energía al cual está destinado el numerador. A veces resulta conveniente determinar esta contante mediante el cálculo de engranajes.

Para determinar la constante C_N del medidor de energía a base de la relación de engranajes del registrador, se empieza determinando los engranajes conductores y engranajes conducidos. En las figuras 20c y 21 los engranajes conductores están trazados con líneas gruesas y los engranajes conducidos con líneas finas. En la representación matemática, los numeradores de los quebrados representan los números de dientes de los engranajes conductores y los denominadores los números de dientes de los engranajes conducidos. El sin fin se considera como un engranaje cuyo número de dientes es igual a 1 salvo en los casos excepcionales en que se trata de los sin fin de dos o tres entradas. En estos casos el numero de dientes del sin fin es de 2 o 3 respectivamente.

Figura 21. Tren de engranajes



3. TIPOS DE MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La medición de la energía eléctrica tiene varias finalidades, pero la principal finalidad del uso del medidor de energía (contador), es la comercialización de la misma. Al principio del desarrollo de su utilización, la comercialización, o sea su venta, se efectuaba de manera muy simple. Se facturaba por la unidad de energía vigente (Ah, Wh, kWh). Sin embargo, con el desarrollo industrial y la consecuente búsqueda del abaratamiento de su producción y de su utilización, en vista de su consumo masivo, se hizo necesario la aplicación de tarifas complejas. No es el tema de este libro el tratado económico de la producción y el uso de la energía eléctrica, ya que este tema es muy amplio, complejo y de otra índole. Es obvio que la economía de la producción de la energía eléctrica depende del modo de utilización y esto, a su vez, depende de múltiples factores. Los factores de mayor importancia en la economía mencionada son los siguientes:

- a. La carga máxima que puede soportar la planta generadora.
- b. La distribución de la carga durante las 24 horas.
- c. Las características y el rendimiento eléctrico de los receptores.

En estos factores la creación de una gran variedad de medidores de energía, los cuales, mediante la aplicación de varios tipos de tarifas, permiten obligar al consumidor a ajustar sus instalaciones y sus receptores de la energía eléctrica, así como los horarios de su funcionamiento, de tal manera que la compañía productora trabaje con el mayor rendimiento y, en consecuencia, pueda vender la energía eléctrica a precios más bajos y más asequibles.

3.1. Agrupaciones de los medidores

En vista de lo expuesto y con fin de que se puedan seleccionar los medidores para que cumplan con su propósito, se les puede agrupar en los siguientes grupos principales:

Grupo A: en consideración del sistema de la red a través de la cual se utiliza la energía.

1. Medidores monofásicos.
2. Medidores trifásicos (para 3 y 4 conductores).

Grupo B: en consideración del tipo de receptor cuyo funcionamiento influye en la tarifa.

1. Medidores de energía activa.
2. Medidores de energía reactiva.
3. Medidores de energía aparente.

Grupo C: en consideración del horario de la utilización y de la máxima carga de corta duración:

1. Medidores de la tarifa múltiple.
2. Medidores de la demanda máxima.

Los diferentes tipos de medidores pueden según el modelo, pertenecer a un grupo o a varios.

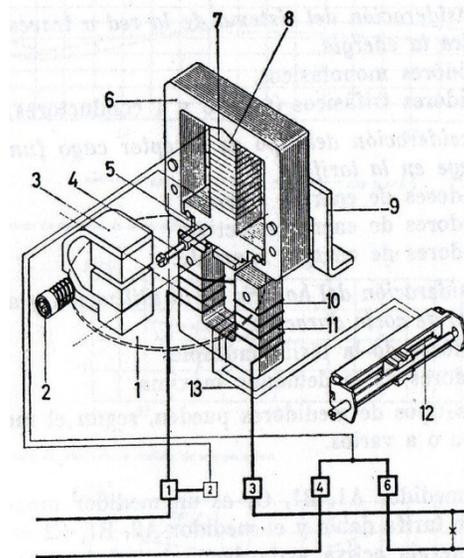
Ejemplo: el medidor A1, B1, C1 es un medidor monofásico de energía activa y de tarifa doble y el medidor A2, B1 C2 es un medidor trifásico de energía activa y de demanda máxima.

A continuación se describen los tipos de medidores correspondientes a cada uno de los grupos enumerados. En los esquemas de los medidores se utilizarán la codificación y la numeración de los bordes de conexión según las normas internacionales IEC, lo que se puede apreciar en los esquemas agrupados en la tabla en la tabla de la figura 24.

3.2. Medidor monofásico de energía activa (A1, B1)

El sistema motor descrito en el capítulo anterior se utiliza en todos los tipos de medidores de energía de corriente alterna. Su conexión es “vatimétrica”, o sea la bobina de intensidad en serie con el consumo y la bobina de tensión en paralelo con la red. Utilizando dos o tres de los sistemas se construyeron medidores trifásicos y, conectando la bobina (o las bobinas) de tensión de diferente manera, se obtienen medidores de energía activa, reactiva y aparente. La figura 24 muestra en perspectiva los principios de su construcción en lo que refiere a su utilización como medidores monofásicos de energía activa, existen algunas variantes en sus conexiones internas cuyos detalles resume la tabla de la figura 23. En el presente manual se utiliza la codificación y la numeración de los bordes de conexión según las normas internacionales IEC, aunque en algunos países rigen todavía las normas británicas BSS, utilizadas en USA, Canadá, Japón e Inglaterra. La figura 23 muestra dos marcas de medidores de AEG (según las normas IEC y DIN) y de FUJI (según las normas BSS). La diferencia radica en que según las normas IEC un conductor de entrada por el 4 y sale por el 6; en cambio; según las normas BSS el primer conductor entra por 1 y sale por 6 y el segundo conductor entra por 3 y sale por 4.

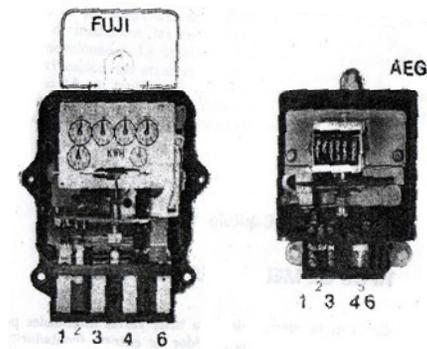
Figura 22. Medidor monofásico de energía activa



(1. Disco-rotor, 2. Ajuste posición imán de freno, 3. Imán de freno, 4. Ajuste de baja carga, 5. Tubo de cobre (carga), 6. núcleo de electroimán de tensión, 7. Bobina de tensión, 8. Columna central del núcleo de tensión, 9. Soporte, 10. Bobina de intensidad, 11. núcleo de electroimanes intensidad, 12. Resistencia variable, 13. Arrollamiento de $\cos\phi$)

De esto resulta que el puente une los bornes 2 y 6 en el sistema IEC y 3 y 4 en el sistema BSS. La bornera está protegida con una tapa precintada independientemente de la tapa del medidor, la cual puede ser sacada únicamente en los laboratorios de contraste y de legalización.

Figura 23. Muestra dos marcas de medidores FUJI y AEG según IEC



3.3. Esquemas de conexiones de medidores monofásicos

La figura 24 muestra varios esquemas de conexiones internas de los medidores monofásicos, el esquema n.º1 corresponde al sistema normalizado según IEC y el esquema n.º2 según BSS. El esquema n.º3 representa la conexión “bipolar” de la bobina de intensidad de medidor. Este sistema se utiliza en los casos de la conexión del abonado a las dos fases de la red trifásica cuando existe el neutro en la red. La mitad de las espiras del electroimán de intensidad esta intercalada en una fase (R) y la otra mitad en la segunda fase de la red (S o T). La finalidad de este tipo de conexión interna del medidor es la protección de la Compañía de Electricidad contra el fraude que podría efectuar un abonado deshonesto al conectar algunos receptores entre una fase y tierra.

El esquema n.º4 corresponde al medidor monofásico para altas intensidades de corriente cuando es imprescindible el uso del transformador de intensidad. Como se puede apreciar en el esquema, este medidor tiene separada eléctricamente la bobina de tensión del circuito de intensidad. Siendo anulado el puente “vatimétrico” entre los bornes 1 y 2. Los bornes 2 y 5 sirven para la conexión independiente de la bobina de tensión a las dos fases de la

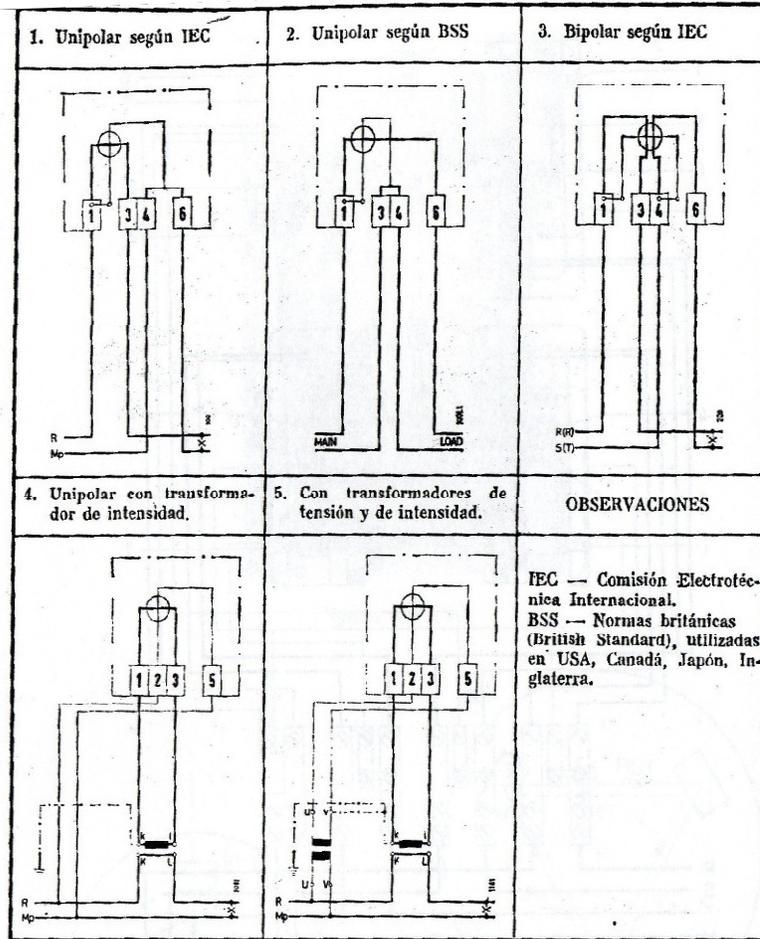
red. La bobina de intensidad está prevista para 5 A. Intensidad que corresponde a la corriente nominal secundaria de los transformadores de intensidad. En consecuencia el medidor es de $I_{nom} = 5$ A y U_{mno} de la red. El numerador considera la relación de transformación del transformador de intensidad previsto, de modo que su constante está relacionada con la energía real medida. El contraste de este medidor en laboratorios de legalización se efectúan con relación a $I_{nom} = 5$ A, teniendo en cuenta la relación de transformación del transformador de intensidad. Sobre la chapa de identificación del medidor debe figura la relación del transformador, por ejemplo:

$$U_{nom} = 120V ; I_{nom} = \frac{200}{5} A$$

El esquema n. °5 el de medidor de energía en la red de alta tensión y, por tanto, está previsto el uso de los transformadores de tensión y de intensidad. Su bobina de tensión, es para 100 V, tensión que corresponde a la tensión normalizada del secundario de los transformadores de tensión y la bobina de intensidad es para 5 A como en el caso anterior. En consecuencia es un medidor de 100 V y 5 A. las relaciones de transformación de ambos transformadores de medición están incluidos en la constante del numerador. La identificación del medidor debe contener ambas relaciones de transformadores, por ejemplo:

$$U_{nom} = \frac{6000}{100} ; I_{nom} = \frac{20}{5} A$$

Figura 24. Esquemas de conexión de medidores monofásicos de energía activa



3.7. Medidores de energía reactiva

Consideraciones de tipo económico. Como ya se ha expuesto, en corriente alterna se deben considerar 3 expresiones de potencia: 1) la potencia activa, $P = U \cdot \cos\Phi$ en sistema monofásico, y en sistema trifásico, $3 \cdot U \cdot 1 \cdot \cos\phi$; 2) la potencia reactiva, $Q = U \cdot 1 \cdot \sin\Phi$ en sistema monofásico, y en sistema trifásico, $Q=3 \cdot U \cdot 1 \cdot \sin\Phi$ 3) la potencia aparente $S = U \cdot 1$ y en sistema trifásico $S = 3 \cdot U \cdot 1$. La potencia activa P se mide en W, kW y MW; la potencia reactiva Q se mide en Var, kVAr y la potencia aparente S en VA, kVA y NVA. A consecuencia de estos tres conceptos de potencia surgen tres conceptos de energía como producto de cada tipo de potencia por el tiempo: A_p , A_Q Y A_S .

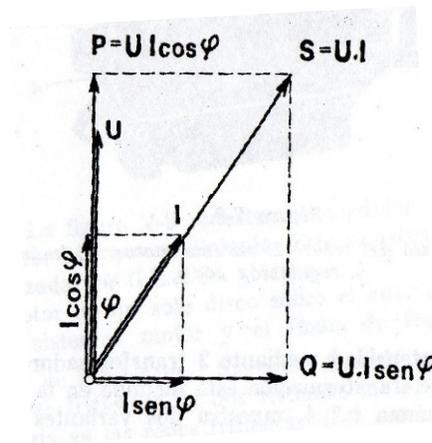
La energía activa, que es el producto de la potencia activa por el tiempo ($A_p=P \cdot t$), se mide con los medidores de energía activa, monofásicos y trifásicos, según el caso, y se expresa en Wh, kWh y MWh y es la energía que realmente efectúa el trabajo. El abonado paga la compañía por la cantidad de energía calculada en las unidades mencionadas, según la tarifa aplicada.

La energía denominada reactiva ($A_Q=Q \cdot t$) se mide en Varh, kVArh y NVArh y, la energía aparente ($A_S=S \cdot t$) se mide en Vah, kVAh y MVAh.

En el diagrama vectorial de la figura 32 se puede apreciar que en la mayoría de los casos no se puede transferir al abonado la “pura energía activa” A_p , ya que depende de las características inductivas y/o capacitivas de los receptores que utiliza el abonado. Aunque la componente reactiva A_Q de la energía no efectúa ningún trabajo efectivo, el transporte de la energía total provoca pérdidas en las líneas de transporte y en las redes de distribución y, por tanto, las compañías aplican ciertas medidas a sus abonados para que se vean obligados a ajustar sus instalaciones y receptores para compensación de

estas pérdidas. En resumen, les obligan a mejorar el factor de potencia ($\cos\Phi$) en sus instalaciones. No es el tema del presente manual enumerar todos los medios en los cuales el usuario puede hacer frente a estas obligaciones. En cambio, se explica a continuación el principio de funcionamiento de los medidores especiales que registran la energía reactiva A_P y Aparente A_S .

Figura 25. Diagrama vectorial del medidor de energía eléctrica



Midiendo el consumo de energía activa A_P y el consumo de la energía reactiva A_Q habidos en el mismo periodo del tiempo contable, por ejemplo en un mes, se puede determinar el valor promedio del $\cos\Phi$ con el cual funcionaban las instalaciones del abonado durante este periodo. Esta medición tiene mucha importancia en los casos de contratos por el suministro de la energía eléctrica; contratos que prevén tarifas especiales para ciertos límites del factor de potencia ($\cos\Phi$). Para un $\cos\Phi$ cuyo valor oscila alrededor de "1" se ofrecen mejores condiciones económicas para el abonado que para un $\cos\Phi$ bajo. En tales casos tanto la compañía productora como el usuario tienen interés en el control del $\cos\Phi$.

Midiendo la energía activa A_P y la energía reactiva A_Q durante el mismo periodo, mediante un simple cálculo se obtiene el valor promedio del desfase:

Ejemplo: en una instalación, el medidor de energía activa registró durante un mes 860 kWh y el medidor de energía reactiva, 500 kVArh.

$$tg\varphi = \frac{Q}{P} = \frac{500}{860} = 0.58$$

Lo que corresponde al $\cos\varphi = 0,86$.

El valor de la energía aparente A_s durante este periodo se calcula por:

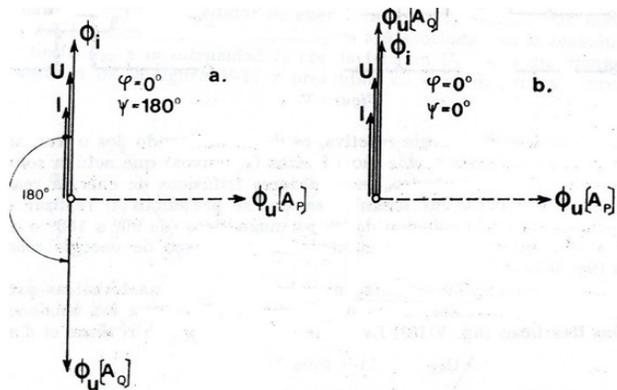
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 994kVAh$$

3.5. Medidor monofásico de energía Reactiva, (A1, B2)

En la construcción del medidor energía reactiva se utiliza el mismo sistema motor que en los medidores de energía activa. Esto es factible debido a que $\sin\varphi = \cos(90^\circ - \varphi)$ en los medidores de energía activa los flujos \varnothing_m y \varnothing_u producidos por la intensidad de la red en la bobina de la intensidad y por la intensidad I_u en la bobina de tensión respectivamente, están desfasados entre sí casi 90° (ver "condición de 90° " en el capítulo 2). Según lo expuesto anteriormente, las máximas revoluciones del rotor de un medidor de energía activa deben producirse cuando el ángulo de desfase φ es 90° igual a cero ($\cos\varphi = 1$). Contrariamente, en el medidor de energía reactiva, las máximas revoluciones del rotor deben producirse cuando el desfase φ es igual a 90° ,

($\cos\varphi = 0$). Este efecto se puede obtener desfasando el flujo Φ_u en otros 90° más, o sea hasta 180° (figura 33) o también colocando el vector I_u de la bobina de tensión V . en este último caso el ángulo Ψ entre ambos flujos es igual a cero (figura 33b).

Figura 25. Diagrama vectorial del medidor de energía reactiva



La rotación de los flujos magnéticos Φ_u y Φ_i se pueden realizar conectando una resistencia pura R_1 delante de la bobina de tensión (figura 34 a) y otra resistencia pura R_2 en paralelo con la bobina de intensidad. La figura 34 b muestra el mismo símbolo normalizado del medidor monofásico de energía reactiva.

Los medidores monofásicos de energía reactiva tiene poco uso; por lo general, los usuarios interesados en tarifas especiales utilizan las redes trifásicas.

3.6. Medidores de energía aparente

La potencia y la energía aparentes no representan magnitudes físicas sino puramente numéricas. Sin embargo, se utilizan estos conceptos para la estimación y el cálculo de la carga de los generadores y de los transformadores, limitada por su máxima intensidad de corriente. En vista de ello, se incita al usuario, por medio de las tarifas especiales, para que sus receptores funcionen con un factor de potencia, ($\cos\varphi$) del máximo valor posible (0,8 a 1). Para la aplicación de estas tarifas especiales, aparte de los medidores de energía activa (AP) y de los medidores de energía reactiva (AQ) ya descritos, se utilizan también los medidores de energía aparente (AS), por lo general, en combinación con un elemento “de demanda”.

3.7. Medidores para fines específicos

Los medidores de registro simple de energía activa o reactiva están provistos de un solo numerador, de modo que este registra el consumo total efectuado durante las 24 horas del día. En consecuencia, el usuario paga siempre el mismo precio por kWh de la energía consumida durante cualquier día.

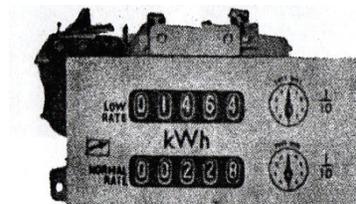
Sin embargo, la máxima economía en la producción y la distribución de la energía eléctrica depende en gran escala de que la carga total fuera aproximadamente constante. Esto no es posible debido a que las centrales suministran energía durante ciertas horas del día para la industria y durante una parte de la noche para la iluminación. Existen sin embargo periodos denominados “ociosos” durante los cuales la planta funciona casi en vacío, o

sea durante las avanzadas horas de la noche. Ofreciendo al abonado la energía a precio mucho más bajo durante estas horas “ociosas”, se le puede incitar que utilice la energía durante estas horas en los receptores cuyo funcionamiento no depende del horario. Por lo general este tipo de receptores son los calentadores de agua contruidos con aislamiento térmico, bombeadores para llenar los tanques, etc. Estos fines se consiguen aplicando los medidores de tarifa múltiple y especialmente de doble tarifa.

3.8. Medidores monofásicos y trifásicos de doble tarifa

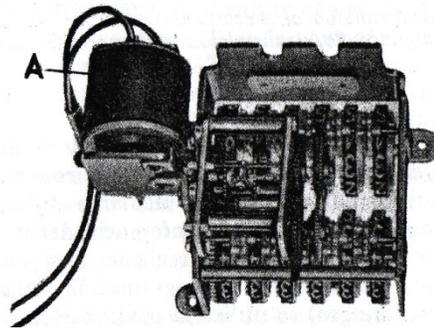
La figura 44 muestra el cuadrante del medidor de doble tarifa (marca English Electric). La flecha indica cual de los numeradores de tarifa alta (normal rate) o de tarifa baja (low rate) está funcionando. La conmutación de las tarifas se efectúa con un relé (A), fijado al soporte de ambos numeradores (figura 45), energizando su electroimán, mediante un reloj exterior de contacto. Para mantener constantes los momentos de fricción que se originan en los engranajes de los numeradores, el mismo esta accionado mediante un diferencial con ruedas planetarias de modo que funciona de un lado o de otro. La figura V-26 muestra el mecanismo de doble tarifa utilizado en los medidores de marca AEG.

Figura 26. Cuadrante del medidor de doble tarifa



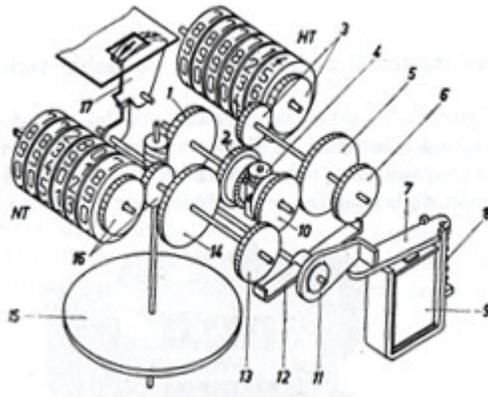
El reloj que acciona el relé de numeradores, exterior al medidor, funciona por lo general a cuerda para evitar los efectos de interrupciones en el suministro de energía. El mecanismo de accionamiento del reloj tiene una reserva de cuerda que se le proporciona eléctricamente.

Figura 45. Conmutación de las tarifas con un relé



La figura 47 muestra un reloj de contacto marca AEG. El reloj está provisto de un dial de programación de conexiones y desconexiones del numerador de la tarifa baja mediante el desplazamiento de los contactos corredizos sobre la circunferencia del disco. Los discos de programación diaria (figura 48) realizan una vuelta completa en 24 horas. Cuando se trata de programación semanal (tarifas bajas los sábados y domingos) se utiliza la modificación con la cual el disco de programación realiza la vuelta completa en 7 días.

Figura 28. Esquema de funcionamiento del mecanismo contador de doble tarifa para contadores AEG



(1.rueda helicoidal, 2.rueda principal izquierda, 3.transmision del mecanismo contador de tarifa alta, 4.rueda planearía, 5.rueda de transmision al mecanismo contador de tarifa alta, 6.rueda de trinquete, 7.armadura del conmutador de tarifa, 8.resorte de tracción, 9.disparador de tarifa, 10.rueda principal derecha, 11.palanca de trinquete, 12.resorte de la palanca de trinquete, 13.rueda de trinquete del mecanismo contador de tarifa baja, 14.rueda de transmision al mecanismo contador de tarifa baja, 15.rotor del contador, 16.transmision del mecanismo contador de tarifa baja, 17.colisa)

Los medidores de doble tarifa de construcción americana funcionan aproximadamente en la misma forma que los escritos, con la diferencia que el reloj de control está colocado dentro de la misma caja del medidor, de modo que el conjunto ocupa menos espacio.

Las figuras 49 y 50 muestran dos medidores de doble tarifa (fabricación polaca marca METRONEX), monofásico y trifásico respectivamente, en la figura V-32 se puede apreciar los esquemas de conexión de medidores de doble tarifa con los transformadores de intensidad y de tensión son similares a las conexiones de los medidores de energía activa.

Para las tarifas especiales se utilizan medidores de tres, cuatro y más numeradores (figura 52) cuyo funcionamiento y construcción están basados en la aplicación de mayor numero de diferenciales en los mecanismos y relés múltiples.

Figuras 29 y 30. Reloj del medidor y discos de programación diaria



Para el control de la potencia máxima requerida por el usuario durante ciertas horas del día, se utilizan los medidores especiales denominados “medidores de demanda máxima”. Este control o la limitación de potencia, y *no la energía*, tienen por objeto evitar la necesidad de instalar muy altas potencias en plantas generadoras, potencias que implicarían una alta demanda de potencia durante ciertas horas del día para luego funcionar a poca carga y, en consecuencia, con bajo rendimiento. Para aclarar estos conceptos se puede tomar el ejemplo siguiente:

Figura 31. Medidor de doble tarifa

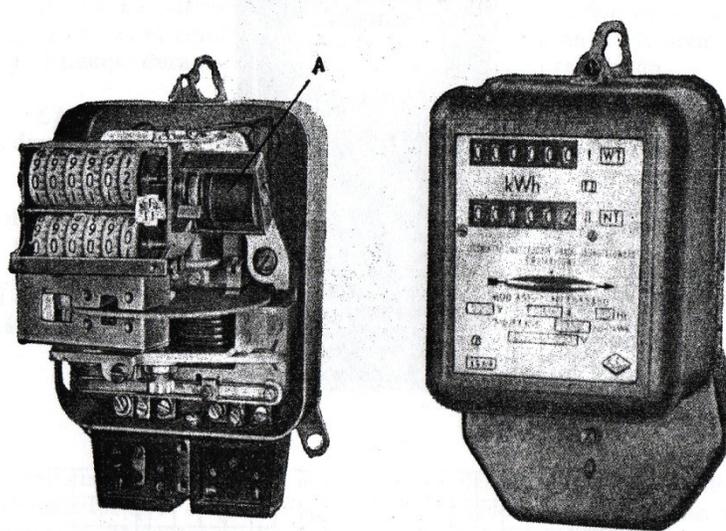
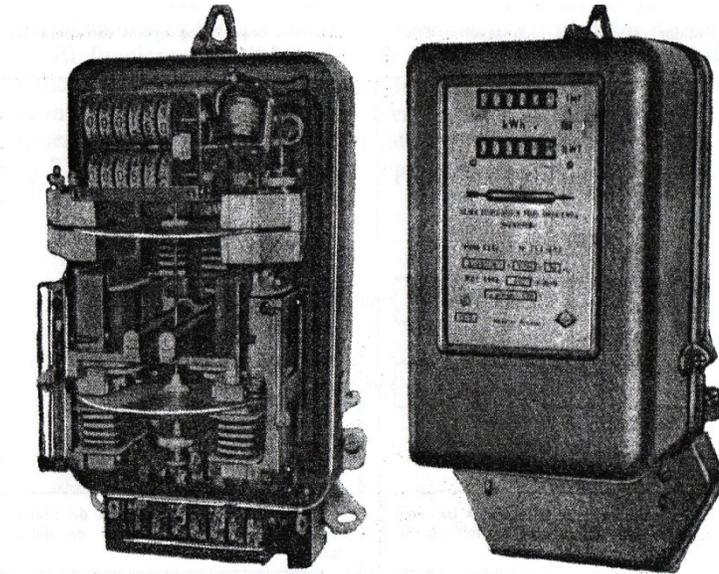


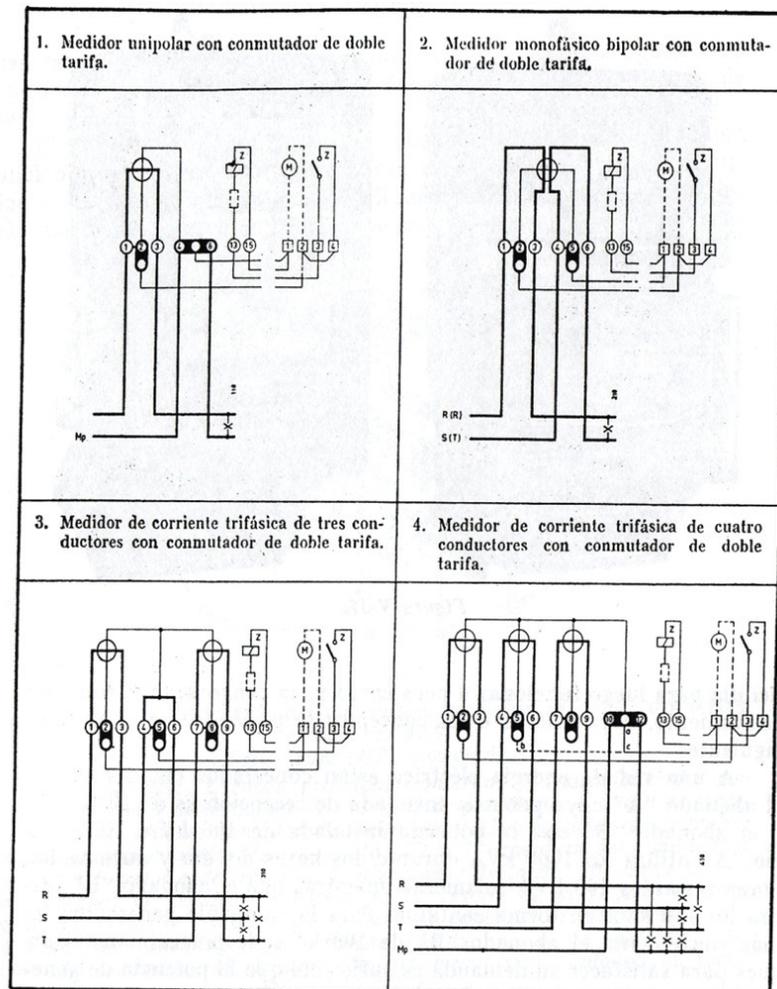
Figura 32. Medidor de doble tarifa



A una red de energía eléctrica están conectados dos abonados: el abono “A” cuya potencia instalada de recepción es de 1000 kVA y el abonado “B” con la potencia instalada de 100 kVA. El usuario “A” utiliza los 1000 kVA solamente, mientras que el abonado durante dos horas del día y durante las horas restantes 100 kVA solamente, mientras que el abonado “B” utiliza los 100 kVA en forma continúa. Para la compañía generadora es más conveniente el abonado “B” de 100 kVA de potencia instalada pues para satisfacer su demanda es suficiente que la potencia de generación sea del orden de 100 kVA. En el caso del abonado “A”, cuya demanda máxima es de 1000 kVA, la planta debe proveerse para esta potencia la cual se utilizará durante ciertas horas del día solamente.

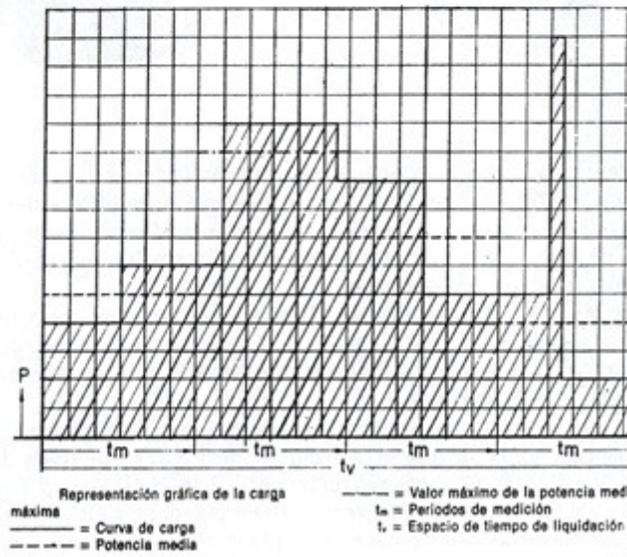
De este ejemplo se deduce que el abonado "B" debe pagar la energía consumida con una tarifa más económica que el abonado "A", ya que él no influye en los gastos fijos de instalación no aprovechable en la planta, en 100%.

Figura 33. Esquemas de conexiones de medidor de doble tarifa



Lógicamente la carga que aparece momentáneamente en las instalaciones de usuarios grandes puede oscilar mucho; pueden aparecer picos de poca duración (segundos o pocos minutos), los cuales pueden ser soportados sin dificultades por las plantas generadoras, pero que harían subir el precio unitario de la energía para el consumidor en forma desproporcional. Para obtener los valores medios de la potencia máxima requerida se utilizan los medidores de demanda máxima, mediante los cuales se obtiene el valor medio de la potencia máxima requerida durante un periodo de tiempo determinado con anterioridad, por ejemplo durante 15 o 30 minutos. Para tal interpretación se considera la potencia máxima (de demanda), o la carga máxima pedida, a un valor medio de la potencia máxima durante un periodo de medición considerado como periodo básico de cálculo. Este concepto ilustra la representación grafica de la carga máxima en la figura 53.

Figura 34 y 35. Medidor tipo especial diagrama de carga máxima



En los medidores de demanda máxima, la indicación de los kW requeridos es el resultado del cálculo del consumo en kWh dividido por el tiempo durante el cual este consumo ha sido registrado.

Ejemplo: se tiene un medidor de demanda ajustado para indicar la demanda máxima durante 15 minutos y esta resultara de la ecuación:

$$Potencia\ máxima = \frac{Energia\ consumida\ durante\ 15\ min\ en\ kWh}{15\ minutos}$$

Si durante los 15 minutos se han utilizado los 150 kWh, la demanda máxima durante este lapso de tiempo es:

$$P_{dm} = \frac{150KWh * 60min}{15} = 600Kw$$

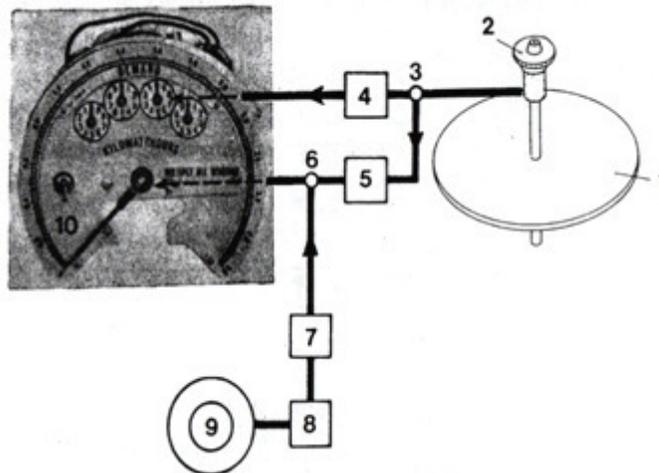
En conclusión, la demanda máxima de potencia que indican estos instrumentos es la carga media durante un predeterminado periodo de tiempo (15, 30 ó 60 min). Existen varios tipos de medidores de demanda máxima, por lo general son los medidores de energía comunes cuyo numerador suma la energía consumida en kWh, pero adicionalmente su mecanismo está acoplado a un dispositivo que convierte los kWh en los kW de valor medio. En consecuencia, los medidores de demanda máxima están provistos, además del numerador que registra la energía consumida en kWh (kVArh o kVah), de una escala graduada en kW o MW con una aguja indicadora. Según el ajuste previo del medidor, la aguja indica la carga media máxima durante un lapso de tiempo t_m predeterminado.

3.14. Medidores de demanda Máxima (A1, B1, C2; A2, B1, C2; A2, B3, C2)

Existen básicamente dos sistemas diferentes de medidores de demanda máxima:

1. Medidores en los cuales el indicador de la demanda está mecánicamente acoplado al mecanismo propulsor del medidor de energía.
2. Medidores en los cuales el indicador de demanda funciona en base al calor y es independiente del mecanismo del medidor de energía.

Figura 36. Funcionamiento del medidor en diagrama de bloques

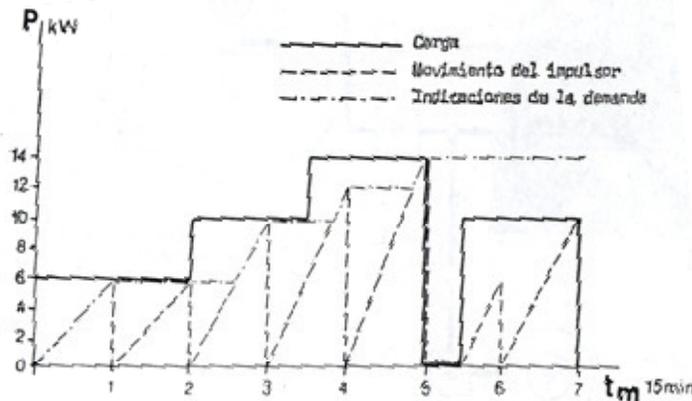


(1.rotor del medidor, 2.sin fin del medidor, 3.acoplamiento del indicador de demanda, 4engranaje del registro de kwh, 5.mecanismo que acciona la aguja de demanda máxima, 6.acoplamiento del mecanismo de reposición, 7.mecanismo deposición del propulsor, 8.temporizador, 9.motor sincrónico, 10.cuadrante del medidor)

El funcionamiento del medidor basado en el primer sistema se explica con el diagrama de bloques de la figura 54. El disco rotor (1) del medidor impulsa a través del tornillo sin fin (2) al mecanismo del numerador que registra los kWh (MWh), representado por el bloque (4). El mecanismo rotor del medidor impulsa también, por intermedio del acoplamiento (3), al mecanismo (5) que acciona al indicador de la demanda. Debido a que el mecanismo (5) esta acoplado al tren de engranajes de la aguja indicadora de los kW se mueve debido al impulso producido por el mecanismo (5). Al llegar la aguja a su desviación máxima, correspondiente el valor medio de la potencia máxima, un mecanismo temporizado (8), accionado por un motor sincrónico del reloj eléctrico, efectúa el desacoplamiento del impulsor de la aguja indicadora queda en la posición a la cual fue desplazada. Los intervalos de las reposiciones pueden ser variados cambiando la relación de engranajes en el mecanismo temporizado.

Los pasos que tienen lugar en el indicador mecánico de demanda máxima se explican claramente mediante el gráfico de carga en el ejemplo de la figura 55. En este ejemplo se consideran 7 intervalos (periodos de medición t_m), durante los cuales se observan los movimientos de la aguja principal propulsora y las posiciones de la aguja indicadora de la demanda máxima, debidas a las variaciones de carga:

Figura 37. Ejemplo de demanda máxima



Ejemplo: intervalos de la demanda.

1. el. intervalo: la carga $P = 6 \text{ kW}$.
La aguja principal impulsadora se desplaza desde 0 hasta indicar 6 kW sobre la escala y vuelve a la posición 0. La aguja de la demanda máxima desplazada por la aguja impulsadora se mueve desde 0 hasta 6 kW y queda en esta posición.
2. Intervalo: La carga permanece constante $P = 6 \text{ kW}$.
La aguja impulsadora se mueve desde 0 hasta 6 kW y vuelve a 0. La aguja de demanda permanece en la posición que indica 6 kW.
3. Intervalo: La carga aumenta desde 6 a 10 kW ($P = 10 \text{ kW}$).
La aguja impulsadora se mueve desde 0 hasta su nueva posición que indica 10 kW.

4. Intervalo: En medio del intervalo la carga aumenta de 10 kW a 14 kW . el impulsor se desplaza desde 0 hasta 12 kW desplazando la aguja de la demanda hasta la posición 12 kW y vuelve a 0. La aguja de demanda permanece en la posición 12 kW.
5. Intervalo: La carga permanece constante en $P = 14$ kW. El impulsor se desplaza hasta 14 kW arrastrando la aguja de demanda desde 12 hasta 14 kW.
6. Y 7. Intervalos: durante estos intervalos la carga baja a valores inferiores de modo que el impulsor sigue moviéndose sin llegar al valor de 14 kW y el indicador de la demanda permanece en su posición de 14 kW.

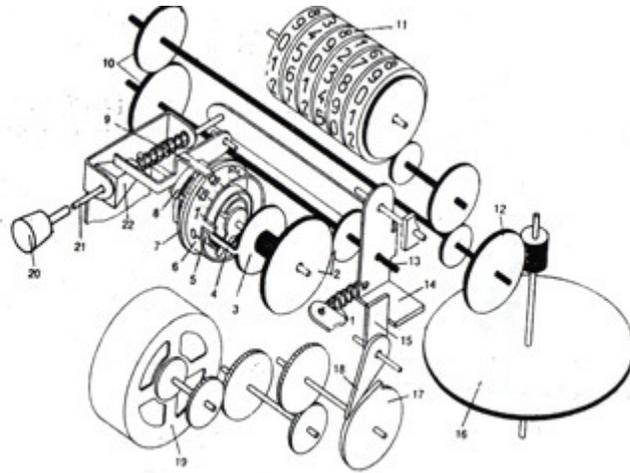
Las características de los medidores de energía con indicadores mecánicos de la demanda acoplados al sistema propulsor del medidor se pueden resumir en los siguientes puntos:

- a. La respuesta es función lineal del tiempo.
- b. Después de cada ciclo de operación, la aguja impulsora se repone automáticamente en posición cero.
- c. La indicación de la demanda en cada intervalo es directamente proporcional a la indicación del numerador de energía.
- d. El costo del medidor es más elevado debido a la alta precisión del mecanismo requerida.

- e. En el medidor de energía pueden aparecer errores adicionales debidos al acoplamiento y fricciones de los engranajes adicionales.
- f. Requieren un mantenimiento periódico frecuente.

La figura 56 muestra un mecanismo completo de un medidor de energía con el indicador de demanda mecánico, de un medidor marca AEG, en el que, en lugar de una aguja se mueve un rodillo indicador. A diferencia del indicador de la demanda mecánico, el cual recibe su impulsión del eje del rotor del sistema de medición de energía, el indicador de demanda térmico funciona con la potencia que se deriva del calor producido por la corriente de consumo. En consecuencia el indicador de la demanda puede ser construido con una unidad separada e independiente del medidor de energía (figura 57a) o puede ser ubicado dentro de la caja del medidor de energía (figura 57b). En el indicador de demanda térmico, el impulso mecánico requerido para el movimiento de la aguja indicadora se obtiene de la energía que convertida en calor produce la dilatación de la espiral bimetálica (primer tomo, Capítulo IX). El principio de la espiral bimetálica (1) (figura 38) está fijado al eje (2) de la aguja indicadora (4), y el extremo (3) al armazón. Al aplicar el calor a la espiral bimetálica ésta se expande originando la rotación del eje (2) y el desplazamiento de la aguja (4) sobre la escala.

Figura 38. Mecanismo completo de un medidor de energía

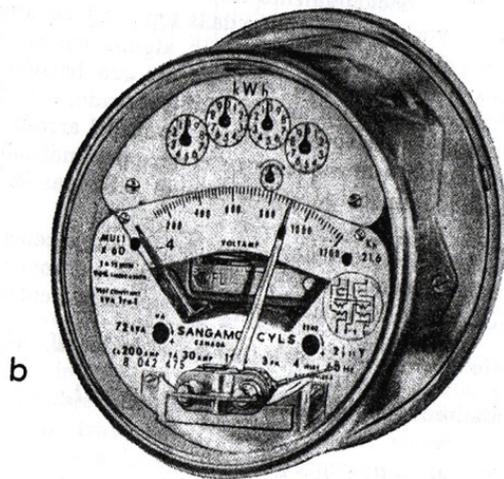
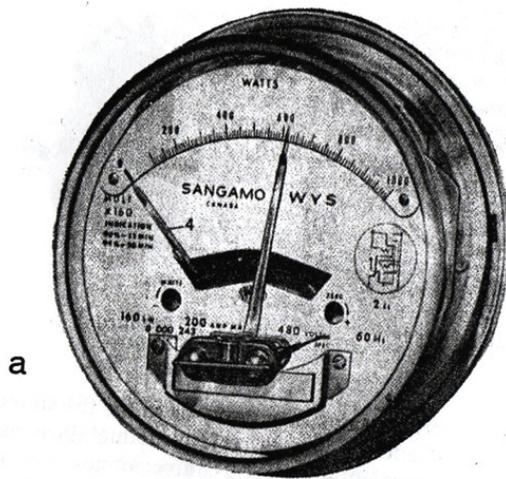


A base de este principio ya se han construido vatímetros electro-térmicos, pero debido a la respuesta retardada de este tipo de instrumentos el sistema no tuvo mucha aceptación. En los últimos años, al aparecer la necesidad de aplicaciones de varias tarifas en función de la potencia máxima requerida durante cortos periodos de tiempo, este retardo en indicaciones del vatímetro bimetálico-térmico resulto ser un factor favorable en la construcción de los indicadores de demanda máxima.

El funcionamiento del indicador de demanda térmico se basa en el calentamiento diferencial de dos espirales bimetálicas (1) (figura 60) fijadas en oposición sobre el eje común (2), de modo que al calentarse las dos espirales a la misma temperatura las fuerzas f de las espirales bimetálicas se compensan y el eje (2) con su aguja indicadora (4) permanece inmóvil. Para obtener mayor sensibilidad y uniformidad de las flexiones, cada una de las espirales está encapsulada en cobre o aluminio (5). La capsula de cobre o

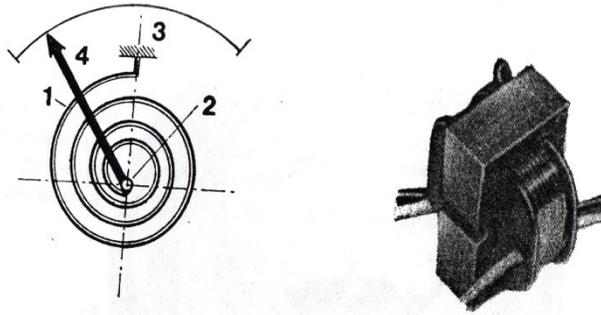
aluminio (5) sirven como acumuladores de calor. Cada una de las espirales bimetálicas está asociada con una resistencia calentadora (R), confeccionada con alambre de manganina, elemento que se caracteriza por muy bajo coeficiente resistivo de temperatura. El funcionamiento está basado, como en cualquier otro tipo de vatímetro, en la aplicación de la tensión y de la intensidad. El indicador no debe efectuar desviación alguna cuando falte cualquiera de los dos parámetros. Como fuente de una tensión proporcional de la red se utiliza un pequeño transformador (figura 59) cuyo secundario tiene la derivación en el punto medio del arrollamiento. La figura 60a muestra el esquema de conexión del indicador de demanda en el estado sin carga, o sea cuando actúa la tensión solamente.

Figura 39. Medidores de energía eléctrica



Las dos resistencias calentadoras iguales ($R+R$) están conectadas en serie a la tensión secundaria del transformador que es proporcional a la tensión de la red U . en consecuencia, por el circuito circula la intensidad de corriente $I_U = \frac{U_S}{2R}$ proporcional a la tensión U , originando en ambos calentadores iguales unidades de calor ($I_U^2 = \frac{U_S^2}{4R}$)

Figura 40: principio de la espiral bimetálica



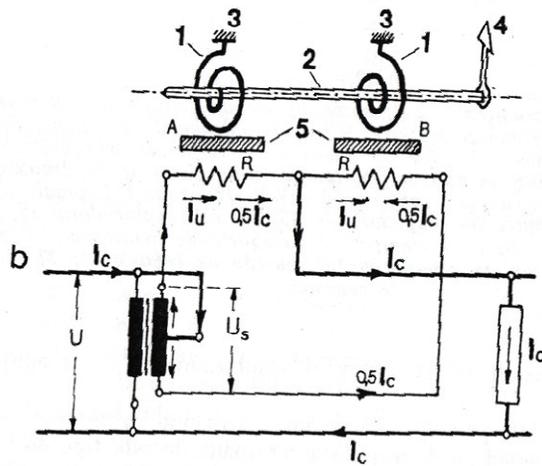
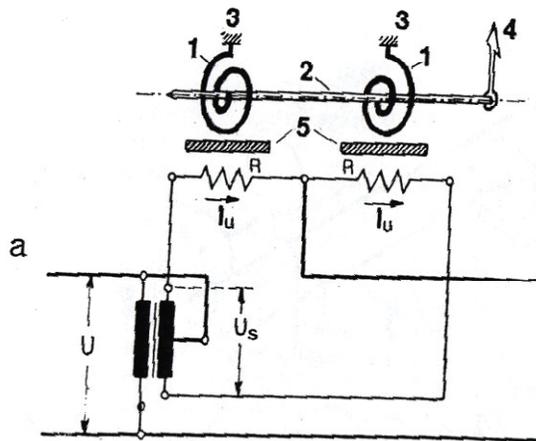
$$Q_A = P_A = I_U^2 R = \frac{U_S^2}{4R}$$

$$Q_A = Q_B$$

$$Q_B = P_B = I_U^2 R = \frac{U_S^2}{4R}$$

Las dos espirales bimetálicas están fijadas al eje de oposición, de modo que las fuerzas que se deben a la expansión de las espirales por el calentamiento son iguales ($F_A = F_B$) y no producirán desviación de aguja cuando por el circuito no circula corriente de carga.

Figura 41. Esquema de conexión del indicador de demanda



1. espira bimetálica, 2. eje, 3. extremo fijo de la espira, 4. aguja indicadora, 5. acumulador de calor, R. resistencia de manganina del calentador

En la figura 60 se puede apreciar el estado del circuito, debido a que el receptor está conectado, Circula la corriente de carga I_c .

- Por las dos resistencias en serie $2R$ circula la intensidad I_u originada y proporcional a la tensión U_s , $I_u = \frac{U_s}{2R}$.
- Debido a la carga aplicada circula la corriente I_c y en la derivación del arrollamiento secundario del transformador se bifurca en $2 \times 0,5 I_c$, en consecuencia, por la resistencia del calentador "A" circula la suma de las corrientes $I_u + 0,5 I_c$ y por la resistencia del calentador "B" circula la diferencia $I_u - 0,5 I_c$.

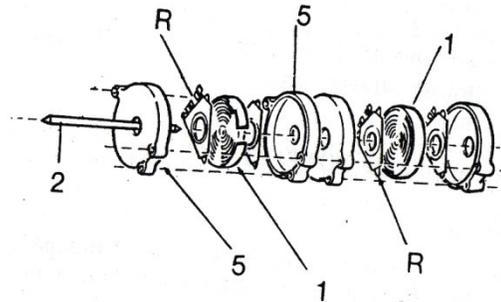
$$I_u = \frac{U_s}{2R} \text{ y } 0.5 I_u = \frac{1}{2} U_c$$

$$Q_A \text{ o } P_A = \left(\frac{U_s}{2R} + \frac{I_c}{2} \right)^2 * R \text{ y } Q_B \text{ o } P_B = \left(\frac{U_s}{2R} - \frac{I_c}{2} \right)^2 * R$$

$$Q_A - Q_B = P_A - P_B = U_s I_c$$

De esto resulta que la diferencia de calor originada por la diferencia de las potencias en los calentadores A y B origina un momento motor proporcional al producto $U \cdot I$. siendo la componente activa de la intensidad que produce el calor $I \cos \phi$, las indicaciones de la aguja (4) son proporcionales a $U \cdot I \cos \phi$ [W, KW, MW]. Igual que en los medidores de demanda mecánicos, la aguja (4) (figura 57) solidaria del eje (2) es el impulsor de la aguja indicadora de la demanda, la cual queda en su posición hasta su reposición efectuada desde el exterior del instrumento.

Figura 42. Representa internas de un indicador de demanda

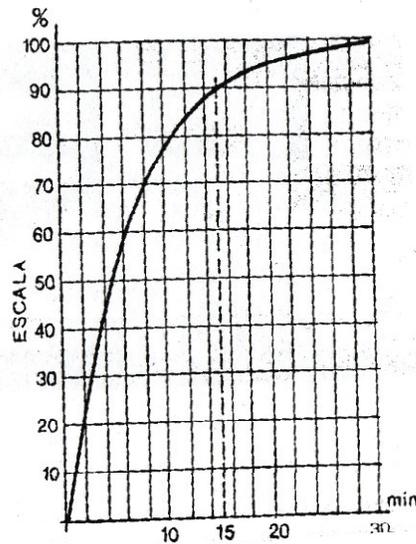


La figura 61 muestra el despiece de un indicador de demanda térmico fabricado por SANGAMO (Canadá). Las indicaciones cifradas tienen el mismo significado que las de la figura 60.

Debido a la capacidad acumulativa de calor del elemento, la indicación del instrumento no da una respuesta inmediata a los cambios de la carga. Este retardo se debe a que aplicar calor a un cuerpo, al principio una porción de este calor es absorbida por él hasta que desaparezca la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y el ambiente; luego se establece el equilibrio y las indicaciones de las variaciones de la carga siguen la curva exponencial de calor (figura 62).

Cuando la carga se aplica a un instrumento calibrado, por ejemplo, al ciclo de operación de 15 min. Se duración, se requieren 15 minutos para que el instrumento indique 90% de la variación de la carga y hasta 30 minutos para que llegue a 99%. Se fabrican indicadores de demanda con otras características, 30 min. Para 90% y 60 min. Hasta 99%, los efectos del calentamiento por el sol u otras fuentes de radiación de calor son despreciables ya que los instrumentos de este tipo están provistos de un aislante térmico especial; además existen varios dispositivos compensadores (espirales bimetálicas adicionales, etc.) particulares para productos de cada fabricante.

Figura 43. Representa la curva exponencial de calor



El sistema térmico descrito se puede utilizar introduciendo ciertas modificaciones en la construcción de los indicadores de demanda de potencia aparente y potencia reactiva. El sistema térmico de indicadores de demanda máxima está muy divulgado en el continente americano y especialmente en Canadá (SANGAMO) U.S.A (GENERAL ELECTRIC) donde se obtiene resultados excelentes en este tipo de medidores para la aplicación de varios tipos de tarifa, sin necesidad de recurrir a los complicados mecanismos de los indicadores mecánicos, ya descritos.

3.10. Medidores electrónicos

La medición de energía eléctrica que se efectúa mediante medidores o contadores, resulta de interés para calcular la cantidad de energía que la compañía suministradora debe facturar a los consumidores. También se utiliza para conocer la cantidad de energía a través de las redes de distribución que no son traducidas precisamente en trabajo útil o electromecánico por falta de compensación de cargas reactivas.

Años atrás, la comercialización de la energía eléctrica se efectuaba de manera muy simple porque se facturaba en función de la unidad de energía vigente (Ah, Wh, KWh). Sin embargo con el permanente desarrollo industrial, y la consecuente búsqueda del abaratamiento de la producción por parte de las fábricas, se hizo necesaria la aplicación de tarifas más complejas.

Es importante comprender que la economía de la producción de la energía eléctrica depende de su modo de utilización, y este a su vez de múltiples factores. Dichos factores dieron origen a la creación de una gran variedad de medidores de energía, los cuales realizan un proceso de tarifado

que obliga al consumidor a ajustar sus instalaciones y su equipamiento, como también los horarios de su funcionamiento, de tal manera que la compañía productora trabaje con el mayor rendimiento de sus instalaciones de distribución. De esa manera, la energía eléctrica puede ser ofrecida a menores costos.

Históricamente, la medición de la energía eléctrica consumida por un determinado usuario fue y sigue siendo en muchos casos, el medidor electromecánico o instrumento electrodinámico. No obstante, en la actualidad está siendo reemplazado lentamente por dispositivos electrónicos que ofrecen mayor seguridad, eficiencia y flexibilidad para la medición de diferentes parámetros, y no solamente de energía.

Estos equipos poseen memoria no volátil para almacenar datos referidos al comportamiento del sistema, que permiten realizar un seguimiento del mismo. También están adaptados para implementar un sistema de energía prepaga, que tienen bastante aceptación por parte de los distribuidores, porque permite un mejor control por fraude o hurto de energía.

Para distinguir los medidores en cuanto a su propósito, se los puede agrupar de la manera siguiente: 1) Considerando el sistema de la red a través de la cual se utiliza la energía: *medidores monofásicos y trifásicos* (para tres y cuatro conductores). 2) Considerando el tipo de receptor cuyo funcionamiento influye en la tarifa: medidores de energía activa, *reactiva ó aparente*. 3) Considerando el horario de utilización y la máxima carga de corta duración: medidores de tarifa múltiple y de demanda máxima. Existen diferentes tipos de medidores que pueden pertenecer a uno o varios de estos grupos.

A pesar del constante desarrollo que han tenido los medidores electromecánicos en las últimas décadas, los medidores electrónicos o de estado sólido están abarcando el mercado porque no sólo realizan la misma función que los anteriores, sino que no cuentan con partes móviles o electromecánicas, evitando el error por desgastes y deformaciones. Tienen más prestaciones porque miden energía activa, reactiva y aparente, la demanda máxima, doble y multi-tarifa. Miden la tensión de línea, la corriente que está circulando, el factor de potencia, y otras características de la red, que determinan un parámetro global denominado *calidad de energía*. Actualmente hay una gran variedad de este tipo de medidores, cada uno con características diferentes, que permiten cubrir prácticamente todas las necesidades en cuanto a medición paramétrica se refiere.

De todas maneras hay que tener en cuenta todo lo referido a medidores electromecánicos, como ser errores, márgenes para un buen funcionamiento, y sobre todo las reglamentaciones. Casi todas las firmas presentes en el mercado dedicadas al desarrollo de contadores electromecánicos incluyen en sus avances a los electrónicos, dada la gran versatilidad que presentan los mismos, y por ser la tendencia actual. En este trabajo se ha desarrollado un sistema para medir energía eléctrica empleando dispositivos electrónicos de última generación, de una manera rápida y confiable. Los componentes empleados permiten una gran flexibilidad de desarrollo que facilita que el prototipo sea permanentemente mejorado sin ulteriores inversiones. Las grandes compañías internacionales que desarrollan sistemas electrónicos de medición de energía utilizan circuitos integrados del mismo tipo que los presentados, como ser *Analog Devices, Cirrus Logic y CR Magnetics*.

3.10.1. Materiales y métodos

Recientemente, la firma Analog Devices anunció la salida al mercado del CI ADE7756, un medidor de potencia eléctrica, basados en registros, con interfaz serial y salida de pulsos. El mismo ofrece entre otras las siguientes características notables: una salida de tren de pulsos cuya frecuencia es proporcional a la potencia activa.

Interfaz serial de cuatro hilos compatible con SPI, que permite la comunicación entre microcontroladores. Alta exactitud (menos del 0,1% de error sobre un rango de 1000 a 1). Detección de baja tensión o ausencias de la misma durante lapsos predefinidos, con umbrales de tensión de línea programables. Muestras digitales de las formas de onda de tensión y corriente. Calibración digital de la potencia, la fase y la deriva (offset de entrada). Sensor de temperatura incorporado. Referencia de tensión de $2,5 \pm 8\%$ y tiempo de $30\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ incorporada. Salida de pulsos sincronizada con los cruces por cero de la tensión de línea, que puede ser utilizada para extraer información de tiempo o frecuencia y sincronizar dispositivos externos. Disponibilidad de 18 registros de datos (6 de solo lectura y 12 de lectura y escritura), accesible a través de la interfaz serial desde un registro maestro de comunicaciones. Ancho de banda nominal de 14KHz. Variación típica en la frecuencia de salida del orden de 0,2%. Entradas analógicas de alta impedancia (390KW mínima), capaces de aceptar señales hasta de $\pm 1\text{V}$. Opera con frecuencias de reloj desde 1MHz hasta 10MHz. El valor nominal es de 3,579545MHz. Entradas y salidas lógicas compatibles con TTL y CMOS. Alimentación a partir de una fuente sencilla de +5V. Bajo consumo de potencia (15mW, típico). Rango de temperaturas de desde -40°C hasta $+85^{\circ}\text{C}$.

El ADE7756 incorpora en una misma pastilla, dos convertidores A/D sigma delta de segundo orden, una referencia de tensión, un sensor de

temperatura y todos los circuitos de procesamiento de señales requeridos para efectuar mediciones reales de energía y potencia activa. Cada canal análogo de entrada posee un amplificador de ganancia programable o PGA con cuatro selecciones de ganancia posibles: 1, 2, 4 ó 16. Esta selección se efectúa escribiendo un código de tres bits para cada canal en un registro de 12 bits llamado GAIN. En este mismo registro, con un código de 2 bits, se selecciona también el rango de la señal de entrada del canal 1 entre tres opciones posibles: 1,0V, 0,5V, ó 0,25V.

Además del registro GAIN, el ADE7756 posee otros 17 registros funcionales cuyos contenidos pueden ser actualizados o leídos a través de cuatro líneas de señal asociadas a la interfaz serial (SCLK, DIN, DOUT y CS). En este proyecto se utilizó un microcontrolador, el cual contiene toda la estructura de un microcomputador, es decir, la unidad central de proceso (CPU), memoria RAM, memoria ROM y circuitos de entrada/salida. Este se concibió como un dispositivo programable que puede ejecutar un sinnúmero de tareas y procesos. Circuitos lógicos, manejo de periféricos, temporizadores y estructuras de computadoras, todo programable y alojado en un solo integrado. En nuestro caso se empleó el PIC 16F84, un microcontrolador de Microchip Technology, cuyo consumo de potencia es muy bajo.

Posee 1024 bytes de memoria de programa donde cada palabra es de 14 bits, memoria EEPROM de 64 bytes y memoria RAM de 128 bytes. Posee memoria de programa tipo FLASH, la cual se puede reprogramar sin necesidad de un borrado previo. Los dos puertos del PIC16F84 se pueden configurar como entradas o como salidas, pin a pin, en forma independiente. A continuación se describe la manera como el CI ADE7756 puede medir energía. La potencia es la razón del flujo de energía desde la fuente hasta la carga en la unidad de tiempo. Esto está dado por el producto instantáneo de las señales de

tensión y de corriente. La señal resultante se denomina 'potencia instantánea', y es la velocidad del flujo de energía en cualquier instante de tiempo. La unidad de potencia es el Watt o Joule/segundo.

Se tiene entonces $v(t) = 2.V.\text{sen}(w.t)$, e $i(t) = 2.I.\text{sen}(w.t)$; donde V es la tensión eficaz e I la corriente eficaz.

Luego tenemos que $p(t) = v(t).i(t) = V.I - V.I.\cos(2w.t)$.

La potencia promedio sobre un número entero de ciclos está dada por:

$$P \equiv \frac{1}{nT} \int_0^{nT} P(t)dt = VI$$

Donde T es el período del ciclo y P la potencia activa o real. Podemos observar que la potencia activa es igual a la componente continua de la potencia instantánea $p(t)$ o sea V.I. Esta es la relación utilizada para calcular la potencia activa en el ADE7756. La señal de potencia instantánea se genera por la multiplicación de las señales de tensión y corriente. La componente continua de la potencia instantánea es luego extraída por el Filtro Pasabajos 2 (LPF2) para obtener información de la potencia activa. Los cálculos de potencia o energía en el ADE7756 pueden calibrarse a través del contenido del registro APGAIN. Para obtener información más detallada, referirse a la hoja de datos. Como se definió anteriormente, la potencia es la velocidad del flujo de energía. Esta se expresa matemáticamente de la siguiente manera: $P=dE/dT$; donde P es la potencia y E la energía. Por lo tanto, la energía está dada como la integral de la potencia:

$$E = \int P.dt$$

El ADE7756 realiza la integración de la potencia activa por la acumulación continua de la misma en un registro interno de 40 bits denominado Active Energy (AENERGY [39:0]). Esta acumulación de tiempo discreto es equivalente a la integración en tiempo continuo, por lo tanto tenemos:

$$E = \int P. dt = \lim_{T \rightarrow 0} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} p(nT)T \right\}$$

Donde n es el número de muestras discretas de tiempo y T el período de muestreo. El período de muestreo para el registro de acumulación en el ADE7756 es 4/CLKIN. En este caso se utilizó un oscilador de 4 MHz, por lo tanto T=1ms. Utilizando el registro *Interrupt Enable*, el ADE7756 puede configurarse para emitir una interrupción (IRQ) cuando el registro *Active Energy* esta casi lleno, ó cuando ocurre un sobre flujo. Como ya se mencionó, el período de muestreo es 1ms (4/CLKIN). Con señal sinusoidal máxima en las entradas analógicas y el registro APGAIN puesto a 000h, el valor de la palabra promedio del LPF2 es CCCCdh (ver hoja de datos). El máximo valor que puede almacenarse en el registro Active Energy antes de un sobrellenado es 239 ó 7FFFFFFFh. Por lo tanto, el tiempo de integración calculado en estas condiciones es:

$$Tiempo = \frac{7FFFFFFFh}{CCCCdh} \cdot 1\mu s = 10.48 segundos$$

Supóngase que se desea conocer cuál es el valor de energía consumida en Wh cada vez que se llena el registro Active

Energy. Para esto se necesita conocer con que valores de tensión y corriente funcionará el dispositivo. Utilizando valores para un medidor estándar es decir: tensión nominal de 220V, corriente nominal de 10 A y corriente máxima de 50 A. La salida promedio del LPF2 es CCCh con señal máxima en las entradas analógicas, entonces calculando la potencia con señal máxima se obtiene (dada la expresión anterior de potencia con valores eficaces): $P = 220V \cdot 50A = 11000 \text{ W}$. Entonces, 11000W durante 10,48 segundos equivale a una cantidad de energía de:

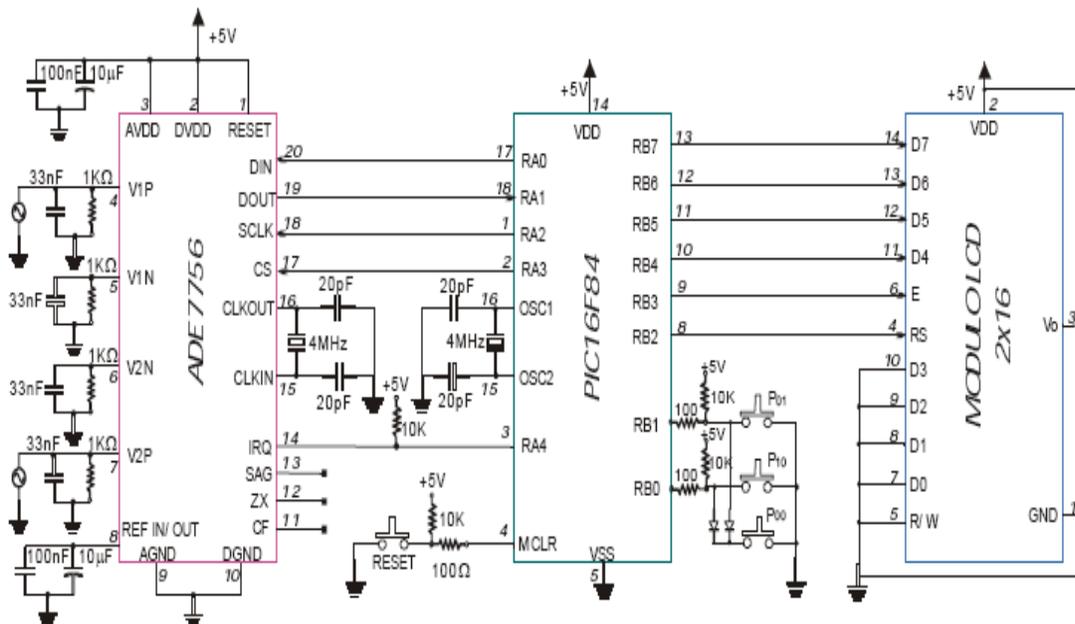
$$E = 1100W \cdot 10.48572s \cdot \frac{1h}{3600s} = 32,0397Wh$$

Por lo tanto, cada vez que se llene el registro Active Energy se habrá consumido una cantidad de energía igual a 32,0397Wh. Con estos datos funciona el dispositivo que se presenta en este trabajo. En el registro Interrupt Enable se habilita con un '1' el bit7 AEOF (Active Energy Overflow); entonces cada vez que se llene el registro acumulador de energía, se pondrá en '1' el bit 7 del registro Interrupt Status y el pin IRQ se pondrá a un nivel bajo indicando con esto que ha ocurrido una interrupción.

Si se habilitan varias interrupciones, cuando ocurra alguna de ellas el pin IRQ se pondrá a un nivel bajo; entonces, leyendo el registro Interrupt Status se sabrá cómo atender dicha interrupción de acuerdo al bit de dicho registro que se haya puesto a '1' indicando la causa de la misma. El pin IRQ volverá a su nivel alto cuando se haya leído el registro Interrupt Status, si no se lo lee, se mantendrá bajo. En este trabajo se habilita solamente la interrupción que indica que el registro acumulador de energía se ha llenado. Entonces si se controla la salida IRQ con el microcontrolador, cada vez que esta se coloque a un nivel bajo se lee el registro Interrupt Status para que dicho pin pase nuevamente a su

nivel alto y se suma 32Wh a los registros que llevarán la cuenta de la energía consumida. Este funcionamiento tan sencillo es posible porque la mayoría de los medidores comerciales utilizados para facturación (por reglamento) visualizan cinco dígitos más la coma y un dígito decimal (00000,0 KWh); esto en kilowatts-hora; por lo tanto se tendría una precisión de un tercio del dígito decimal ó de 1/30 KWh. Para hacerlo funcionar como medidor de energía se mantienen aún las posibilidades de calibración a través de los pulsadores con algunas modificaciones; se controla la salida IRQ y se suman los valores de energía consumida, se almacenan en la memoria como así también los parámetros de funcionamiento; por lo cual no es necesario calibrarlo cada vez que se encienda el dispositivo. La figura N° 1 presenta el diagrama circuital esquemático del sistema.

Figura 44. Diagrama circuital esquemático del sistema electrónico.



Como sucede con todos los instrumentos de este tipo, los parámetros para la inicialización del sistema están almacenados en una memoria EEPROM

(Electrical Erasable Programmable Read Only Memory). De esta manera, al encender el dispositivo, estos valores se cargan inmediatamente para empezar a operar, y dada la velocidad, resulta transparente para el usuario. En este proyecto, el microcontrolador contiene toda la información para la inicialización del sistema en la memoria EEPROM interna, que fue grabada previamente. Por lo tanto, al encender el instrumento esta información se carga a la RAM del PIC, y posteriormente a los registros del ADE7756. Al finalizar esta etapa previa donde se cargan los registros internos del ADE con los valores que determinan el modo de funcionamiento y tipo de comunicación serial con el PIC, comienza la operación de medición. Al finalizar el conteo se muestra por la pantalla la letra E, el contenido de los registros de energía, y las unidades en KWh. Posteriormente el microcontrolador se encarga de revisar si hay alguna interrupción ó si se encuentra presionado algún pulsador para ingresar al modo de calibración en forma manual. Cabe aclarar que por razones de espacio no es posible presentar el detalle del programa del microcontrolador que realiza el control de todo el sistema.

3.10.2. Ventajas y desventajas de los medidores electrónicos

Dentro de las ventajas podemos encontrar

- Medición más exacta, antes 2% ahora 0.5% a 0.2%
- Medición de muchos parámetros: kwh, kw, kvarh, kvar, factor de potencia, de 32 hasta 48 parametros.

- Memoria masiva: registro de eventos y mediciones en el tiempo, lectura de 3 meses anteriores, perfil de carga, etc.
- Comunicación por distintos medios: visual, directa a una pc por moden telefónico.
- Capacidad de automatización de eventos.
- No se puede variar su exactitud, no se puede variar fraude dentro del mismo contador.
- Capacidad de lectura de multi-tarifas: ya se sean horarias, diaria o por estación.

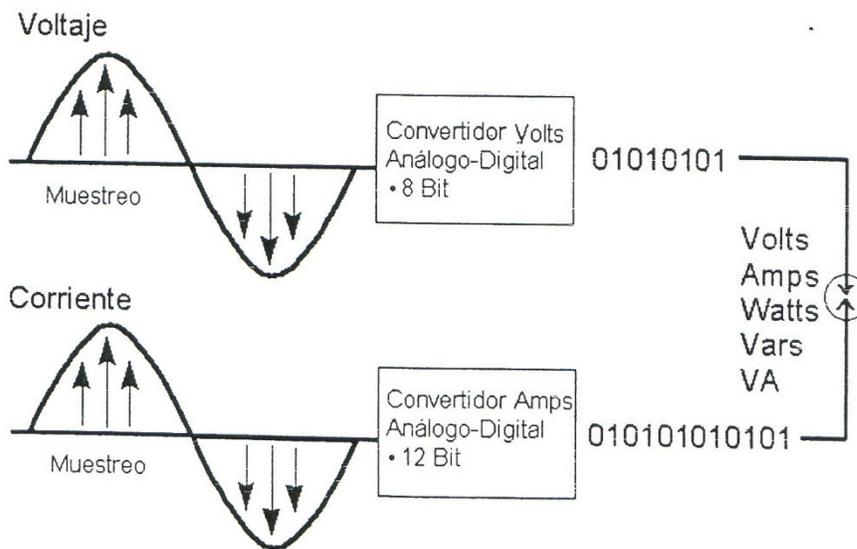
Dentro de las desventajas se pueden mencionar:

- Si no hay voltaje en el servicio, no hay lecturas ni comunicación directa, salvo algunos casos con fuentes auxiliares como en subestaciones grandes. La mayor parte de los fabricantes utilizan la fase A para fuentes de poder del contador
- Por sus componentes electrónicos, son más sensibles a variaciones de voltaje, descargas electro-atmosféricas, por lo tanto se debe tener más cuidado en la tierra física, que la forma de poder aterrizarla es conectando una varilla coperwould sonde la resistencia del medidor tiene que ser mayor a la varilla de cobre para que se puedan drenar corrientes que puedan dañar al medidor. Casi todos los fabricantes utilizan componentes de grado militar por los medidores electrónicos son resistentes para uso en intemperie y altas temperaturas.

3.10.3. Principio de la medición electrónica

Los contadores electrónicos hacen muestreos tanto del voltaje como de la corriente de cada una de las fases y convierten esa información en códigos o números binarios (010100111), luego con distintos procesadores (chips) elaboran los cálculos y controles internos para asegurar su buen funcionamiento y exactitud. A continuación muestran n diagrama de cálculo analógico-digital.

Figura 45. Graficas analógicas – digital de los medidores electrónicos



3.10.4. Mediciones en los medidores electrónicos

Regularmente las pantalla solo pueden desplegar un parámetro a la vez, por lo tanto estos son mostrados en forma rotativa, definiendo el tiempo de exposición. Los parámetros presentados en la pantalla pueden ser hasta 48, entre los principales están.

- Energía: kwh, kvarh, kvas, actual y de 1 a 3 meses anteriores.
- Demanda: kw, kvar,kva, actual y de 1 a 3 meses anteriores.
- Fechas de ultima comunicación, de programación, ultimo reseteo de la demanda y muchos más que dependerán del fabricante

3.10.4. Modos de operación

3.10.4.1. Modo normal

Es el modo que estará mostrando las lecturas en forma regular, generalmente solo se presentan los parámetros de facturación, consumo kwh, demanda kw. Energía reactiva kvarh, factor de potencia, tiempo, registro del medidor número de serie del medidor.

3.10.5. Modo alterno

Es el modo que se presenta con el accionamiento de un dispositivo y presentara temporalmente los datos que se han especificado en la programación, regularmente son datos que son de utilidad para un supervisor o

auditor, como: lectura del mes anterior, última vez que se programo, número de veces que se ha cortado la energía eléctrica apagones, etc.

3.15.4.3 modo de prueba

Este modo permite hacer pruebas instalado el contador en una mesa de calibración o en ello mismo servicio y hacer “pruebas” no calibración del contador, sin alterar los registros se lectura que existieran.

Continuación se presentan un modelo de una caratula se contadores electrónicos y un diseño de pantalla correspondiente.

Figura 46. Carátula de contador quantum

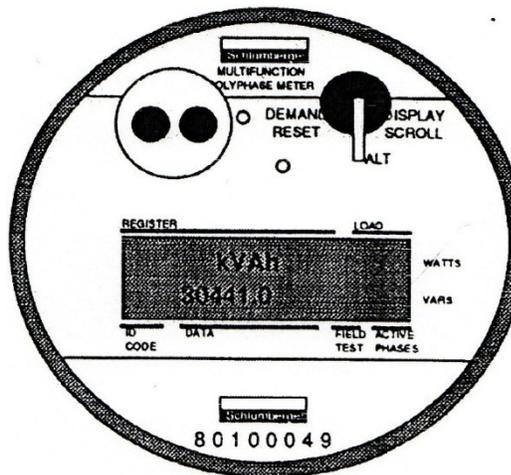
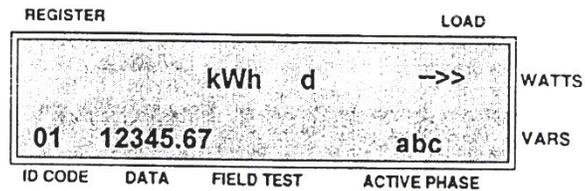


Figura 47. Pantalla del contador quantum

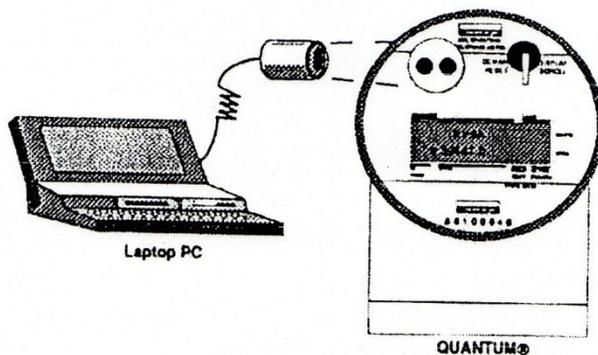


3.10.6. Formas de comunicación

Los contadores electrónicos pueden proporcionar la información por 3 formas generales

- Por medio visual, con la pantalla.
- Por el puerto óptico a un dispositivo de memoria para lectura o a una computadora de escritorio portátil
- Por modem telefónico a una computadora.

Figura 48. Comunicación por puerto óptico y una computadora portátil



3.11. Cajas socket

Es el enchufe usado para conexiones eléctricas entre las líneas de servicio y el contador tipo socket. Es esencial que los contadores socket sean usados apropiadamente con las cajas correspondientes de acuerdo al número de terminales, capacidad de corriente (amps), derivación (By-pass), etc.

3.12. Capacidad

Clasifican por su capacidad máxima de permitir el paso de corriente en forma continua, por lo tanto se debe utilizar de acuerdo a la capacidad del contador (clase).

Por esto, nunca se debe conectar un contador clase 200 en una caja de 100 amperios.

3.13. Estilo

Pueden ser de dos tipos:

Con anillo: o tipo ring, utilizan un anillo de acero inoxidable para asegurar el medidor el contador son la caja, el precinto de seguridad es instalado en este anillo

Sin anillo o ringles: no utilizan el anillo, la tapa de la caja es colocada sobre el aro del contador y el precinto se coloca en el cierre de la caja.

3.14. Derivación (by-pass)

Para contadores con transformadores de medición, tiene la derivación o by-pass para prevenir n circuito abierto en la señal se corriente de los transformadores de corriente (Ct's) cuando el contador es instalado o removido, regularmente es de operación automática.

Figura 49. Caja para el interior

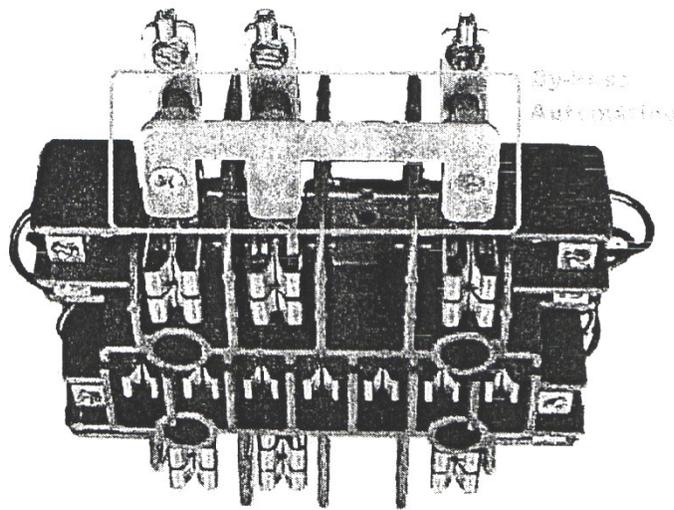
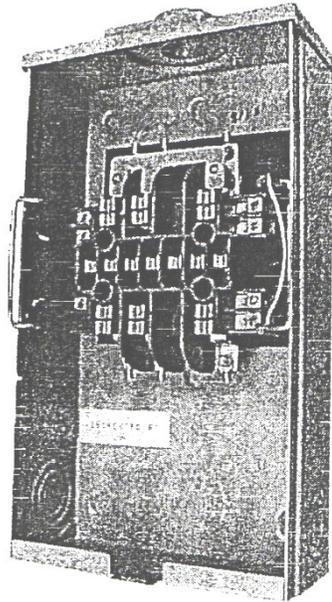


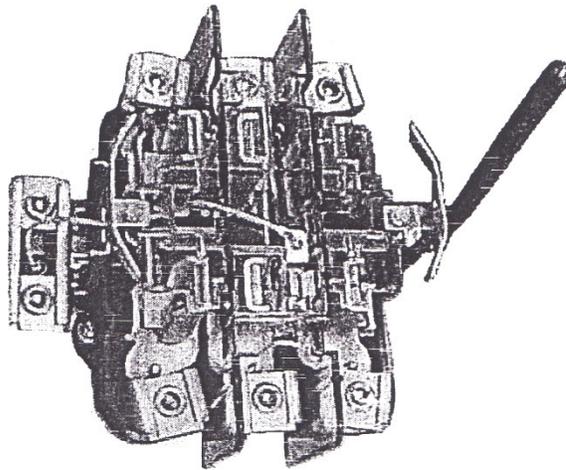
Figura 50. Caja de 13 terminales



Para contadores autocontenidos, la derivación o by-pass manual, es el camino entre las clavijas de entrada y salida para evitar una descarga al operador cuando el contador es removido de la caja si aun existe carga conectada en la instalación. A continuación se muestra la caja de 7 terminales con by-pass manual, para contador trifásico clase 200, autocontenido.

Caja socket para contadores autocontenido

Figura 51. Caja para contador clase 200



3.15. Bornera de pruebas

Las borneras de prueba se utilizan para:

Cortacircuitos los CT's de una medición para aislar el contador para mantenimiento

Hacer pruebas al contador inyectando voltajes y corrientes de prueba (ANSI)

Hacer pruebas al contador con los voltajes y corrientes del punto (IEC)

Hacer pruebas a los circuitos y transformadores de voltaje y corriente

Figura 52. Bornera de prueba para caja tipo (ANSI)

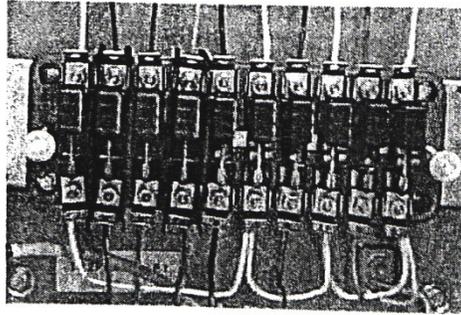
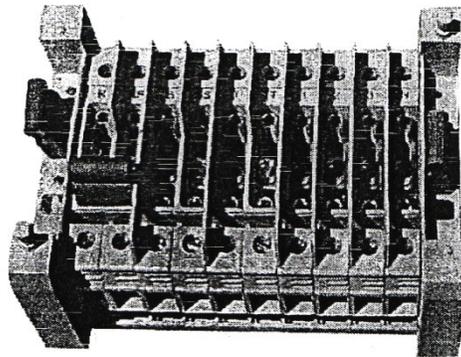


Figura 53. Bornera de prueba tipo (IEC)



3.16. Marchamos de seguridad

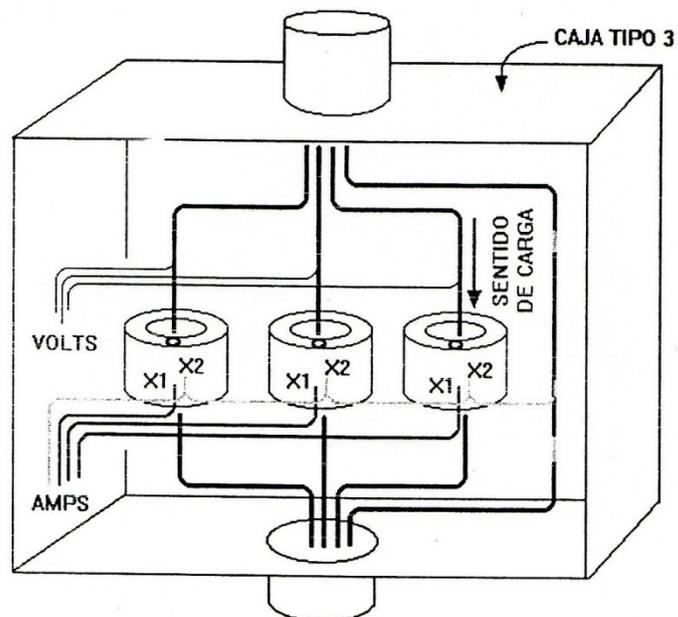
Los marchamos de seguridad o precintos son dispositivos de seguridad instalados con el fin de evitar que un equipo o caja sea abierto sin la autorización y/o supervisión de la empresa distribuidora.

Varias compañías ofrecen distintos tipos de marchamos, de preferencia se deben utilizar marchamos cuya violación sea fácilmente detectable y que permita llevar un registro, es decir numerados y con identificación de la empresa.

Se deben instalar marchamos para proteger la cubierta del contador, las terminales de conexión, cubiertas de transformadores (CT) y potencial (PT), caja tipo 3 y la caja del contador, de tal manera que cuando uno, cualquiera, de estos equipos se abierto, el marchamo se rompa irreparablemente y se evidencie su estado

3.17. Alambrado de cómo se conectan a la bornera de prueba para poder realizar las verificaciones

Figura 54. Conexión de medición secundaria



A la hora de que se encuentren conectadas las líneas de voltaje de corriente y voltaje se puede comenzar con la verificación conectando el patrón que es el que se encarga de poder realizar la prueba.

El equipo tiene seis conexiones en donde tres conexiones son para alimentarlo con las tres fases de los voltajes y las otras tres conexiones son las

que se utilizan para conecta las corrientes y en base de esos datos con que debe de cumplir el patrón para poder realizar la verificación.

Y también cuenta con un óptico que es el dispositivo que se conecta al medidor para poderle realizar la verificación donde el óptico es el que se encarga de dar los pulsos se señal que el medidor da, esas señales las compara el patrón, y por medio de esas comparaciones es como se verifica el medidor ya que el medidor es cuatro veces más exacto que los medidores electrónicos es confiable para determinar si el medidor está cumpliendo con su función según la norma

3.18. Medición trifásica sin CTS

ES EL MEDIDOR de energía eléctrica que no se auxilia de CTs para efectuar su medición y se denomina autocontenido. Este es instalado directamente al circuito para rangos de 15^a 60{a de 30(100)A y de 50(200)A, pudiendo entregar al consumidor de 20 a 96kw de demanda máxima donde la energía activa solicitada por la carga "Z" será

$$W_a = V10 \times I_1 \times \cos\phi_1 + V20 \times I_2 \times \cos\phi_2 + V30 \times I_3 \times \cos\phi_3$$

Figura 55. Diagrama de un medidor sin CTs

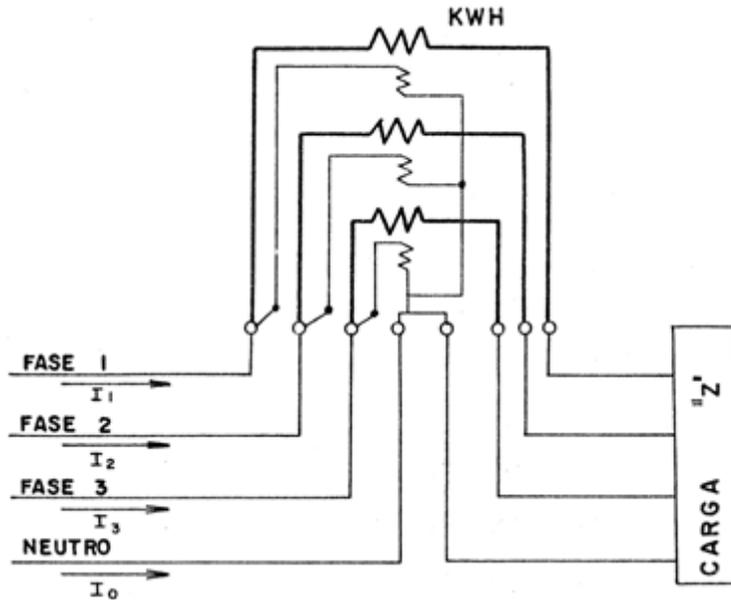
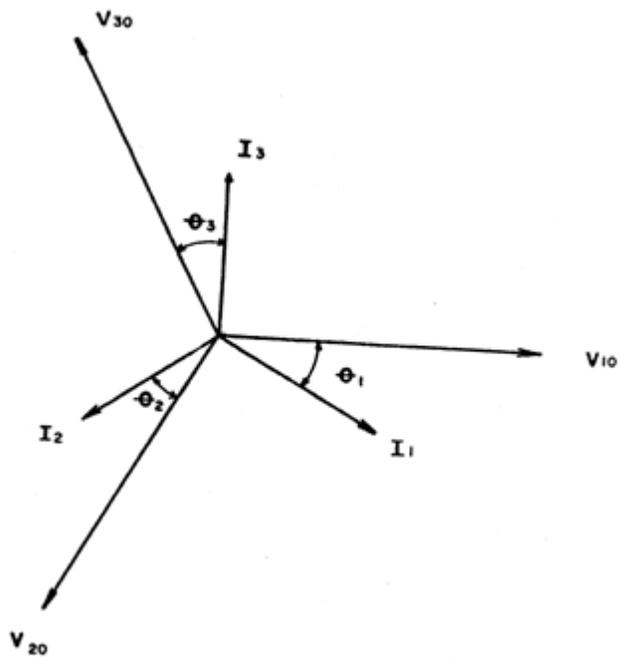


Figura 56. Diagrama vectorial de un medidor sin CTs



De acuerdo al diagrama vectorial (Fig)

$$\cos(\widehat{I_n \times V_n}) = \cos\phi_n$$

Fase 1 $W_1 = V_{10} \times I_1 \cos\phi_1$

Fase 2 $W_2 = V_{20} \times I_2 \cos\phi_2$

Fase 3 $W_3 = V_{30} \times I_3 \cos\phi_3$

De las ecuaciones anteriores, la energía eléctrica activa registrada por el medidor será:

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$

Sustituyendo en la ecuación anterior nos da

$$W = V_{10} \times I_1 \cos\phi_1 + V_{20} \times I_2 \cos\phi_2 + V_{30} \times I_3 \cos\phi_3$$

Comparando la ecuaciones propuesta W_a solicitada por la carga, es igual a la energía eléctrica registrada por el medidor $W_a=W$. si el medidor tiene constante propia debido al tren de engranajes, la ecuación queda como $W_a=KW$, se debe de comprobar que en la instalación de cada fase, el disco del medidor gire en sentido correcto.

3.19. Medicion trifásica con CTS

Este tipo de medidores de energía activa solamente pueden ser instalados con el auxilio de CTs para reducir la cantidad de corriente: amperios, de la instalación, ya que, éstos trabajan con una corriente secundaria de 5 amperios. Los CTs son instalados entre los conductores que alimentan la carga instalada, donde cada CTs alimenta una bobina de corriente del elemento referente a la respectiva fase del circuito.

Las ovinas de potencial deben ser de fácil acceso y nunca soldadas, al igual en la bobinas de corriente como puede verse en el diagrama de la figura siguiente para lo cual se deben cumplir los requisitos siguientes:

- ✓ Los CTs deben de tener la misma relación
- ✓ Se deben de instalar tomando en cuenta la polaridad
- ✓ Los CTs en la instalación deben permanecer corto circuitados, mientras no se les haya conectado carga en sus terminales secundarias
- ✓ La lectura de KWh y KW, respectivamente, deben ser afectadas por la relación de vueltas de los CTs

Figura 57. Representa la medición con CTs

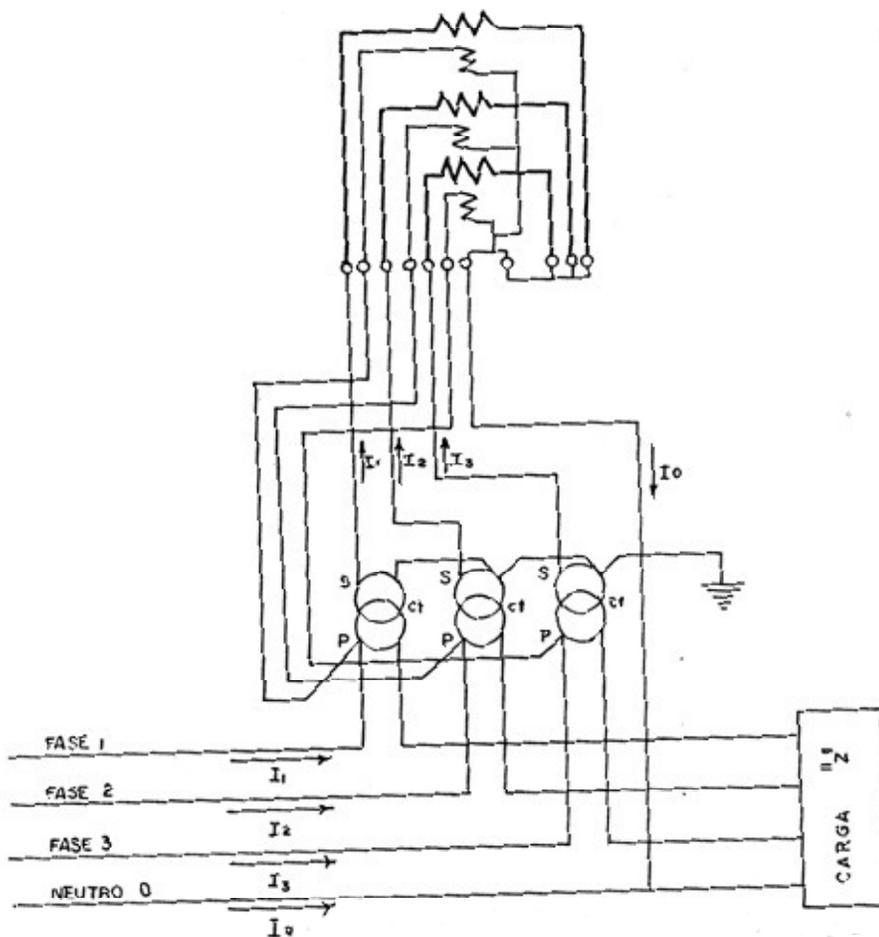


Diagrama esquemático de una medición con CTs con un retorno de corriente
En este caso para obtener la energía eléctrica total W_a solicitada por la carga:
la lectura W registrada por el medidor debe ser multiplicada por la constante de
los transformadores K_c y por la constante del propio medidor.

$$W_a = K \cdot K_c \cdot W$$

En todos secundarios se debe tener cuidado de ser aterrizado por cuestiones
de seguridad del equipo.

4. PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

4.1. Objeto

El presente procedimiento tuvo por objeto dar a conocer los métodos y la sistemática necesaria para realizar la calibración de medidores de energía eléctrica, destinados a trabajar en corriente continua y corriente alterna, en baja frecuencia (incluyendo la frecuencia industrial), identificados con los índices 08-01/02/03/04/10/11/20 en la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica (1) y también para los instrumentos de medida de precisiones media y baja, basados en vatímetros de los tipos electro térmicos y multiplicadores por división de tiempo (TDM).

4.2. Alcance

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se limitó a la calibración de medidores de energía mediante comparación con un patrón medidor de energía eléctrica, y no es aplicable a medidores de elevada exactitud que requieren el uso de instrumentos de mayor nivel metrológico.

Estos medidores pueden ser de medida de energía eléctrica, en corriente continua o en corriente alterna, estos últimos destinados a trabajar en baja frecuencia (incluyendo la frecuencia industrial, 60 Hz).

En corriente alterna los medidores pueden ser de energía eléctrica aparente activa y reactiva, tanto en sistemas monofásicos como polifásicos. Este procedimiento no es aplicable a medida trifásica salvo que estén formados por

tres sistemas de medida monofásica independientes, en cuyo caso se calibrarán cada uno por separado.

Como consecuencia de existir diferencias funcionales entre los medidores a los que se podría aplicar este procedimiento habrá que tener en cuenta estas diferencias en la redacción de las instrucciones de calibración que se elaboren tomando como guía este procedimiento.

4.3. Definiciones

Son de aplicación las definiciones generales de la referencia (9) que se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento.

4.3.1. Patrón de referencia

Patrón, en general de la más alta calidad metrológica disponible en un lugar dado en una organización determinada, del cual se derivan las mediciones en dicho lugar.

4.3.2. Patrón de trabajo

Patrón que se utiliza corrientemente para calibrar o controlar medidas materializadas, instrumentos de medida o materiales de referencia.

NOTAS:

1. Un patrón de trabajo es habitualmente calibrado con un patrón de referencia.
2. Un patrón de trabajo utilizado corrientemente para asegurar que las medidas están realizadas correctamente se denomina patrón de control.

4.3.3. Ajuste

Operación destinada a llevar un instrumento de medida a un estado de funcionamiento conveniente para su utilización.

NOTA: el ajuste puede ser automático, semiautomático o manual.

4.3.4. Calibración

Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones.

NOTAS:

1. El resultado de una calibración permite atribuir a las indicaciones los valores correspondientes del mensurando o bien determinar las correcciones a aplicar en las indicaciones.
2. Una calibración puede también servir para determinar otras propiedades metrológicas, tales como los efectos de las magnitudes de influencia.
3. Los resultados de una calibración puede consignarse en un documento denominado, a veces certificado de calibración o informe de calibración.

4.3.5. Desviación estándar experimental

Para una serie de n mediciones de un mismo mensurando, la magnitud s que caracteriza la dispersión de los resultados, dada por la fórmula:

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

Siendo x_i el resultado de la i-ésima medición y \bar{x} la medida aritmética de los n resultados considerados:

NOTAS:

1. Considerando la serie de n valores como muestra de una distribución, \bar{x} es un estimador insesgado de la media μ y s^2 es un estimador insesgado de la varianza σ^2 de dicha distribución.

2. La expresión S/\sqrt{n} es una estimación de la desviación estándar de la distribución de la media de \bar{x} , y se denomina desviación estándar experimental de la media.

3. La desviación estándar experimental de la media en ocasiones se denomina, incorrectamente error de la media.

4.3.6. Error (de indicación) de un instrumento de medida

Indicación de un instrumento de medida menos un valor verdadero de la magnitud de entrada correspondiente.

NOTAS:

1. Dado que un valor verdadero no puede determinarse, en la práctica se utiliza un valor convencionalmente verdadero.

2. Este concepto se aplica principalmente cuando se compara el instrumento con un patrón de referencia.

3. Para una medida materializada, la indicación es el valor que le ha sido asignado.

4.3.7. Error intrínseco (de un instrumento de medida)

Error de un instrumento de medida, determinado en las condiciones de referencia

4.3.7.1. Incertidumbre de medida

Parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando.

NOTAS:

1. El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar (o un múltiplo de ésta) o la semiamplitud de un intervalo con un nivel de confianza determinado.
2. La incertidumbre de medida comprende, en general varios componentes. Algunos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden caracterizarse por sus desviaciones estándar experimentales. Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por sus desviaciones estándar, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.

3. Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor de mensurando, y que por todos los componentes de la incertidumbre, comprendidos los que provienen de efectos sistemáticos, tales como los componentes asociados a las correcciones y a los patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.

Esta definición es la de la “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida” donde sus bases están expuestas con detalle (en particular ver el punto 2.2.4 y el anexo D de la misma)

4.3.8. Resolución (de un dispositivo visualizador)

La menor diferencia de indicación de un dispositivo visualizador que puede percibirse de forma significativa.

NOTAS:

1. Para un dispositivo visualizador digital, diferencia de la indicación que corresponde al cambio de una unidad en la cifra menos significativa.
2. Este concepto se aplica también a un dispositivo registrador

3.8.1. Trazabilidad

Propiedad del resultado de una medición o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencias determinadas, generalmente a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

4.4. Generalidades

La función de un medidor de energía es sumar e indicar este trabajo eléctrico que corresponde al consumo de la energía, en forma continua.

La unidad de energía en el S.I. es el julio, pero, por razones comerciales, para la energía eléctrica, la unidad utilizada es el Wh (o el kWh). La relación entre ambas es: $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J} (=3.6 \text{ kJ})$.

Los medidores pueden ser de medida de energía eléctrica en corriente continua y en corriente alterna. En el segundo caso lo que ocurre es que la tensión y la intensidad en corriente no suelen estar en fase ello conlleva que la energía activa no coincida con la aparente, como ocurre en corriente continua. Cuando se trata de ondas senoidales (como ocurre en la red de suministro industrial), se tienen tres tipos de energía que se definen a continuación, y para cada uno de ellos existe un tipo de medidor:

Energía eléctrica activa:

$$WP = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot \cos \varphi \cdot dt \quad \text{que se mide en vatios-hora (Wh)}$$

Energía eléctrica reactiva:

$$WQ = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot \sen \varphi \cdot dt \quad \text{en voltamperios reactivos-hora (varh)}$$

Energía eléctrica aparente:

$$WS = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot dt \quad \text{en voltamperios-hora (vah)}$$

Donde φ es la fase entre la tensión y la intensidad de corriente y el $\cos \varphi$ es el llamado factor de potencia.

Figura 58. Factor de potencia



Tomada del Procedimiento 00-5 para la calibración de medidores de energía página 9

Un vatímetro es un medidor de energía eléctrica (activa si se trata de corriente alterna) cuya indicación viene en vatios-hora (Wh) y un vatímetro es un medidor de energía eléctrica reactiva cuya indicación viene en voltamperios reactivos-hora (varh)

Como se ha visto la energía depende de la tensión, la intensidad de corriente, el tiempo, y si se trata de una red de corriente alterna, además depende del factor de potencia. El funcionamiento de un medidor de energía, consecuentemente, está basado en estas magnitudes, aunque el diseño la construcción sea diferente para los distintos tipos de medidores; no obstante, en general, tienen dos bornes de tensión y dos de intensidad de corriente que alimentan de forma separada sus circuitos de tensión y de intensidad.

Se va a calibrar un medidor de energía eléctrica por comparación con otro medidor. En este procedimiento se llamara patrón al medidor que actúa como calibrador y medidor al que va a ser calibrado. Se elige el método por comparación por ser el más sencillo y el más fiable. Puesto que la energía es una magnitud que depende del tiempo, ésta será muy importante durante la

realización de las medidas. El tiempo de medida ha de ser el mismo para los dos medidores y las medidas hay que realizarlas a la vez para asegurarse de que las medidas son exactamente, sobre la misma cantidad de energía en las mismas condiciones. El tiempo ha de ser lo suficientemente largo para evitar errores debidos a la fluctuación de las ondas, por otra parte los dos medidores han de estar sincronizados, es decir el tiempo de medida ha de ser el mismo y al mismo tiempo. Esto asegura que ambos instrumentos midan la misma señal así que lo que nos interesa es la diferencia de lecturas entre ambos.

Un sistema trifásico es una combinación de tres sistemas monofásicos cuyas tensiones están desfasadas 120° en el tiempo. Por lo tanto, la energía activa total medida por un medidor de energía trifásico es la suma de las individuales de cada uno de los sistemas monofásicos.

4.5. Descripción

4.5.1. Equipos y materiales

Para realizar la calibración descrita en este procedimiento es necesario dispones de un sistema de medida compuesto por los siguientes equipos:

Un medidor de energía eléctrica, que actuara como patrón en la calibración, cuya exactitud debiera ser mejor que la del medidor a calibrar (siempre se aconseja que sea al menos cuatro veces mejor).

El patrón de referencia de un laboratorio debe poseer un certificado de calibración en vigor, el cual habrá sido extendido por un laboratorio acreditado en el ámbito de su acreditación o un laboratorio nacional, esto asegura la trazabilidad de las medidas.

Un sistema que suministre la energía que ha de ser medida. Estará formada por una fuente de tensión y otra intensidad de corriente, que serán independientes la una de la otra. Cuando se trate de corriente alterna se tendrá la precaución de que ambas fuentes tengan una alimentación común para asegurar que la frecuencia sea la misma, y como será necesario conseguir cargas con distinto ángulo de fase para conseguirlo, el sistema incorporará, un decalador de fase, que es un dispositivo que permite retrasar o adelantar la onda de tensión con respecto a la de intensidad con el fin de corregir el ángulo de fase entre ellas. A este tipo de carga generada por dos fuentes que se regulan de forma independiente se le llama carga “fantasma” o “ficticia”, y es la empleada en la calibración de medidores de energía.

La distorsión de la onda de tensión y de la onda de intensidad será inferior a la que admita el patrón y el medidor a calibrar, y vendrá indicada en su manual, y en caso contrario se tendrá en cuenta su influencia.

Contador de pulsos patrón, en el caso de que exista una salida de pulsos en el medidor de energía.

NOTA:

Los medidores poseen dos formas de transmitir su información, directamente, mediante la lectura que aparece en el visualizador o mediante una relación numérica entre la cantidad de energía registrada por el medidor y una señal de salida que puede ser: una salida de pulsos (por ejemplo TTL), una salida de pulsos ópticos (un led que emite destellos), o un disco giratorio con un marca que permite contar el número de revoluciones que da ese disco.

Para utilizar esta segunda forma de información será necesario el uso de un contador de pulsos, el cual estará conectado a la salida de pulsos del medidor en el primer caso y a una cámara lectora de pulsos ópticos o de revoluciones del disco en los otros dos casos. En todos los casos la cantidad de energía registrada será proporcional al número de pulsos. Esta proporción el fabricante la expresa como una constante, y es la llamada constante del medidor, puede venir expresada en cantidad de energía por pulso o en número de pulsos por unidad de energía (por ejemplo 20,000 pulsos/kWh).

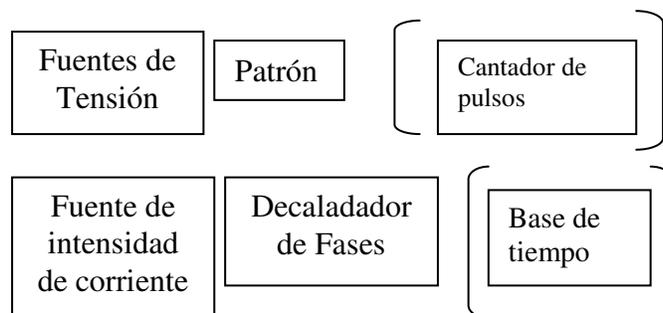
Los contadores de pulsos tienen dos entradas de pulsos, así tienen por una los pulsos del medidor y por la otra los pulsos del patrón, los que hacen es comparar la cantidad de energía medida por uno y por otro y dar el error relativo directamente.

4.5.1.1. Sistema de sincronización.

Cuando no se esté utilizando un contador de pulsos, y el patrón no disponga de un sistema propio de sincronización (a menudo, los patrones están provistos de un sistema de este tipo, pudiendo utilizar una base de tiempos propia o externa, para controlar a otros instrumentos), pero el instrumento a calibrar y el patrón tienen una entrada de sincronización, se puede utilizar una base tiempos externa provista de un interruptor de arranque/parada, para que empiecen la medida y la terminen al mismo tiempo.

Un sistema de medida constara de todos estos elementos (el contador de pulsos y la base de tiempo solo si procede):

Figura 59. Sistemas de sincronización



El patrón puede ser un sistema de medida integrado, es decir, compuesto por todos los equipos mencionados hasta ahora. Así que, únicamente hay que conectar el medidor a calibrar a los bornes de salida del sistema.

Además serán necesarios:

4.5.1.2. Cables adecuados.

La fuente de intensidad suele tener una tensión muy baja, por ello la sección del cable ha de ser de diámetro grande o de su longitud pequeña para que se obtenga el valor deseado. En el caso de la fuente de tensión hay que decir lo mismo, la sección y la longitud han de ser tales que no se produzca una caída de tensión. Y en su caso adaptadores según la compatibilidad de los medidores.

4.5.1.3. Cronometro.

Cuando los instrumentos no se pueden sincronizar como se ha supuesto en el párrafo anterior, porque carecen de sistema de sincronización se utilizara un cronometro para tomar lecturas de los visualizadores a intervalos regulares de tiempo, tomamos el tiempo de la medición con el cronometro en intervalos de tiempo de varios minutos.

4.5.1.4. Nivel.

Para asegurar la posición en que se coloca el medidor, en caso de que sea necesario, este se utiliza para que no haya contrapesos en la posición del medidor para que no afecte la medición.

4.5.1.5. Termómetro.

Con él se tomaran los valores de la temperatura a la que se realiza la calibración.

4.5.1.6. Fasímetro o cofímetro.

Con él se mide el ángulo de fase entre la tensión y la intensidad de corriente

NOTA: generalmente va incorporado en el sistema de suministro de energía.

4.5.2. Operaciones previas

Antes de iniciar la calibración se comprobará que:

El medidor ha de estar identificado de forma permanente y unívoca con su marca, modelo y número de serie; si no lo estuviera se le asignara una identificación unívoca (por ejemplo, la del usuario) que se fijara sobre el instrumento para poder asociarle los resultados de esta calibración y de las que se le hagan en el futuro.

Los bornes están marcados de forma que puedan ser identificados sin ambigüedad, y si el instrumento es trifásico debe acompañarle un esquema de conexión (a ser posible fijado a la caja)

Se dispondrá del manual del medidor a calibrar, para que se conecte correctamente el medidor y se conozcan exactamente sus límites de medida y los pasos a seguir para su utilización. E incluso, en caso de que sea necesario y exista la opción, el ajuste del medidor,

Asimismo, se dispondrá del manual de patrón.

Antes de iniciar la medidas, el patrón deberá permanecer en el laboratorio donde se van a realizar las medidas un mínimo de 24 horas para alcanzar su equilibrio térmico. También es aconsejable que los instrumentos estén alimentados por la red un tiempo mínimo aconsejado por el fabricante, que variará de unos medidores a otros por sus características consecutivas. Una vez alimentados los circuitos de medida se esperará un tiempo prudencial, que pueden variar del la marca del medidor y tipo por lo general se espera una hora ya con los aparatos energizados para tomar datos, hasta que la señal a medir se haya estabilizado.

Deberán mantenerse unas condiciones de referencia (ambientales, tensión, iluminación, etc.....) adecuadas para el medidor patrón y para el medidor de energía a calibrar. Estas condiciones de referencia serán las que indique el fabricante en el manual del aparato.

Si se trata de un medidor que tenga una posición de funcionamiento determinada será importante asegurarse de que se encuentra en esa posición con el nivel, por eso se utiliza el nivel para que no tenga contrapeso y el medidor quede a nivel con el patrón de medida.

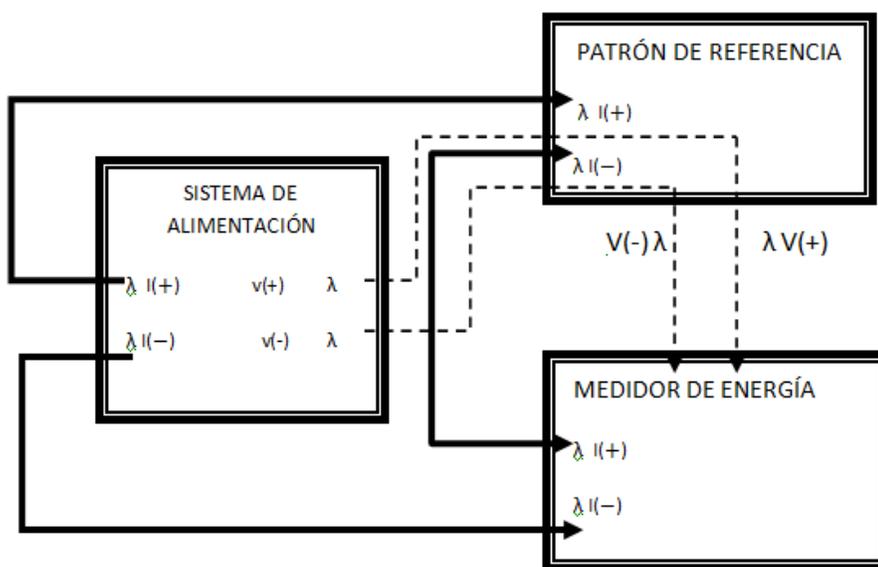
Algunos medidores de energía vienen equipados con el llamado puente de tensión, que es un puente que une los bornes positivos (o “high”) de tensión e intensidad e intensidad de corriente (de una misma fase, si se trata de un sistema polifásico), estos medidores toman por el mismo borne la tensión, para su circuito de tensión, y la intensidad de corriente para su circuito de intensidad. Cuando hay que verificarlos en el lugar donde están instalados, hay que usar carga real. La carga real no permite la regulación independiente de la tensión y la intensidad de corriente, la verificación es de menor precisión y supone un elevado gasto de energía. Hoy día existen equipos de medida (son equipos de precisión media y alta, y coste elevado) que permite realizar una calibración reproduciendo las condiciones de carga real (con el puente de tensión puesto), aunque, por supuesto, siguen siendo equipos de carga ficticia o fantasma, por lo que si se pueden regular la tensión y la intensidad de forma independiente. Cuando se les haga una calibración con carga fantasma, sin simular condiciones reales, habrá que quitar el puente de tensión para que el medidor reciba separadamente la alimentación de sus circuitos.

Cuando se disponga un patrón con buenas características de transportabilidad se podrán realizar las calibraciones in situ, tomando las precauciones necesarias para su transporte, pero, en general, los patrones no deben moverse de su emplazamiento habitual, ya que el trasladarlo de un lugar a otro podría variar sus características metrologicas. Por lo tanto, las calibraciones deben realizarse en el laboratorio o sala de calibraciones donde se encuentra el patrón.

4.5.3. Proceso de calibración

Se conectarán el medidor y el patrón, o lo patrones, a la fuente con la tensión en paralelo, la intensidad de corriente en serie tal y como se indica en la Fig. 3, y en el caso de que sea necesario la señal de sincronización. Si hay contador de pulsos, también se conectarán a éste las salidas de pulsos.

Figura 60. Proceso de calibración



Puesto que la energía es una magnitud que, a su vez, depende de otras magnitudes, como se ha visto anteriormente, sus puntos de medida no se expresan en unidades de energía sino en los valores de tensión e intensidad de corriente, y cuando se trate de corriente alterna también de fase φ . Por ejemplo, un punto de medida sería: 120 V, 5 A, $\cos \varphi = 1$, entonces se ajustan las fuentes a estos valores.

Existen infinidad de combinaciones posibles de tensión, e intensidad de corrientes: se deben elegir los puntos de medida que tengan una importancia particular en la práctica (por ejemplo, en función del uso que vaya a hacer el propietario del medidor a calibrar), según las necesidades del laboratorio o con las que se manifiestan con mas efecto ciertas causas de error.

Los medidores de energía se calibraran en varios puntos, de manera que cubra todos sus valores de tensión e intensidad nominal y con distintos factores de potencia. En el anexo III se ponen algunos ejemplos.

La duración de la medida será la recomendada por el fabricante o en su defecto la necesaria para minimizar los errores debidos a la sincronización y a la posible distorsión de la señal de la fuente para ello la cantidad de energía medida será de un valor significativo para la capacidad de medida del aparato. Por ejemplo, si un medidor tiene una resolución de 0.1 Wh, para los rangos de 5 A y 120 V con factor de potencia entre 1 y 0.5 inductivo o capacitivo, la duración será tal que se obtenga al menos 100 Wh.

Los manuales de los medidores suelen incluir el número mínimo de pulsos o de resoluciones que deben contarse para cada punto de medida para poder despreciar los posibles errores mencionados en el párrafo anterior. En cualquier caso, un posible criterio seria seleccionar el número de pulsos o

revoluciones en función de la constante del medidor y del valor de energía a medir. Por ejemplo, la constante es igual a 60 revoluciones/kWh, por lo tanto, si se desean medir 10 kWh serán necesarias 600 revoluciones.

En muchos casos la recomendación es de tiempo de medida, y entonces si el patrón y el medidor de energía a calibrar disponen de señal de sincronización automática suele ser de 100 s. en caso de que la sincronización sea manual la incertidumbre en la medida de tiempo (incluida sincronización y parada), deberá aportar una incertidumbre pequeña respecto a la incertidumbre de calibración que se quiera conseguir, para ello si la incertidumbre de medida de tiempo es, por ejemplo, 0.5 s y la incertidumbre de calibración que se pretende obtener es del orden del 0.1 % el tiempo de medida debiera ser de 500 seg.

Es aconsejable realizar las medidas de cada punto varias veces (por ejemplo 5) y deben repetirse las mediciones en días diferentes.

NOTA:

Como existen redes trifásicas, hay medidores trifásicos y, por tanto, los sistemas de medida son trifásicos. Sin embargo, los patrones de referencia de los que se suele disponer son monofásicos, así que cuando un patrón de trabajo trifásico tiene que referenciarse a un patrón de referencia monofásico han de realizarse las medidas con cada una de las fases de forma sucesiva, o si se dispone de ellos, utilizar tres patrones monofásicos, cada uno de ellos conectado a cada una de las fases. Cuando, debido a condiciones especiales de cargas, un medidor trifásico solo pueda medir correctamente en la situación de cargas equilibradas, será necesario utilizar un patrón trifásico y aplicar el método general.

4.5.4. Toma y tratamiento de datos.

Si el sistema de calibración no dispone de un controlador de pulsos de manera que ofrezca directamente el error entre las medidas lo que hay que hacer es tomar a mano las lecturas de los dos medidores $L_{Medidor}$ y L_{Patron} cada vez que se detenga la medición.

El resultado de la calibración será el error en cada punto de medida:

$$E = L_{Medidor} - L_{Patron}$$

Pero en electricidad lo usual es expresar el error de la medición en error relativo de la forma:

$$E_r \% = \frac{L_{Medidor} - L_{Patron}}{L_{Patron}} * 100$$

Si la calibración se hace con un contador de pulsos (o un sistema integrado de medida) el resultado será expresado de esta misma forma directamente por el sistema de medida.

La calibración se realizara en las condiciones de referencia y se rechazaran aquellos datos de los que se sospeche que no se obtuvieron en ellas. En el caso de que no sea posible, habrá que tener en cuenta su influencia. En cualquier caso, nunca se sobrepasan los márgenes de funcionamiento del medidor ni del patrón durante la calibración.

Los datos se tomaran de forma que quede reflejado el lugar, fecha y hora a la que se obtuvieron, así como los valores de las magnitudes involucradas, con una tabla, como por ejemplo:

Tener en cuenta su influencia. En cualquier caso, nunca se sobrepasarán los márgenes de funcionamiento del medidor ni del patrón durante la calibración.

Los datos se tomarán de forma que quede reflejado el lugar, fecha y hora a la que se obtuvieron, así como los valores de las magnitudes involucradas, con una tabla, como por ejemplo:

Tabla II. Toma de datos para la verificación.

N^0	U (V)	I(A)	$\cos \varphi$	Temp. (oC)	L_{Medid}	L_{Patron}	$E(q_k)$	$E_r \%$	\bar{q}	$s(q)$

O una tabla como la siguiente, cuando por las características del sistema de medida empleado solo se tenga como datos los errores relativos:

Tabla III. Toma de datos solo con errores relativos.

	U (V)	I (A)	cos	Temp. (oC)	$E_r \%$ (qk)	\bar{q}	$s(q)$

Donde, \bar{q} , es la media del $E_r \%$ que se hayan tomado; a partir de ahora a cada

$E_r \%$ se llamará q_k

$$\bar{q} = \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Y, $s(q)$, es la desviación estándar:

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

4.6. Resultados

4.6.1. Cálculo de incertidumbres

La asignación y expresión de incertidumbres se realizó siguiendo los criterios de la guía EAL-R2 (13).

Como resultado de la calibración se toma el error cuya expresión, considerando todas aquellas correcciones (teniendo en cuenta que también hay que expresarlas en tanto por ciento de error) que afectaría al resultado (aunque como corrección sea nula) sería:

$$E = \frac{LM-LP}{LP} * 100 - \delta_{Pcal} - \delta_{Pder} - \delta_{Pcam} - \delta_{Mres} + \delta_{Mcam} - \delta_{Pint}$$

Aplicando la ley de propagación de las varianzas, considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes y que $LP = LM$, se obtiene:

$$U^2(E) = U^2\left(\frac{LM-LP}{LP} * 100\right) + U^2(\delta_{Pcal}) + U^2(\delta_{Pcam}) + U^2(\delta_{Mres}) + U^2(\delta_{Mcam}) + U^2(\delta_{Pint})$$

Por otra parte, hay que tener en cuenta que todas las contribuciones $u(\delta_i)$ han de estar expresadas como tanto por ciento respecto a la lectura del patrón o del medidor a calibrar, que es prácticamente la misma.

A continuación se indica cómo se estima cada una de estas contribuciones.

NOTA:

En el desarrollo de la expresión anterior se ha tomado

$$E_r \% = \frac{L_{Medidor} - L_{Patron}}{L_{Patron}} * 100$$

Como una sola variable, ya que al repetir medidas puede que no se repita para un mismo punto de calibración el valor de LM por lo que se obtendría una mayor dispersión que no es debida a errores en los aparatos sino a diferentes energías generadas.

Primero se calculara la desviación estándar experimental, para la que se utilizaran los datos obtenidos durante la calibración. (Contribución a la incertidumbre de tipo A)

$$s(\bar{x}) = U\left(\frac{L_{Medidor} - L_{Patron}}{L_{Patron}} * 100\right)$$

Donde: $s(\bar{X}) = \frac{s(X)}{\sqrt{n}}$ y $S(\bar{X})$ es la que se obtuvo en la sección 4.5.4.

Tabla IV. Calculo de incertidumbres

Magnitud	Esperanza matemática	Incertidumbre típica $u(\delta_i)$	Coefficiente de Sensibilidad c_i	Contribución a la Incertidumbre $U_i(y)$
$E_r \%$	\bar{q}	$S(\bar{x})$	1	$S(\bar{x})$
δ_{Pcal}	0	$\frac{U_p}{k}$	1	$\frac{U_p}{k}$
δ_{Pder}	0	$\frac{D_{max}}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{D_{max}}{\sqrt{3}}$
δ_{Pcam}	0	$\frac{C_o}{\sqrt{3}} \Delta t$	1	$\frac{C_o}{\sqrt{3}} \Delta t$
δ_{Mres}	0	$\frac{a}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{a}{\sqrt{3}}$
δ_{Mcam}	0	$\frac{C_M}{\sqrt{3}} \Delta t$	1	$\frac{C_M}{\sqrt{3}} \Delta t$
δ_{Pint}	$D_{\bar{x}}$	$\frac{D_{int}}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{D_{int}}{\sqrt{3}}$
E				$U(y)$ $= \sqrt{\sum_{i=1}^n U^2(\delta_i)}$

4.6.1 Interpretación de resultados

En muchos casos el usuario del equipo define unos límites de tolerancia para los errores obtenidos en la calibración, en función del uso que va a dar al equipo (especificaciones del fabricante, norma, especificación interna, etc....).

En estos casos se debe comprobar que los errores obtenidos son inferiores a los límites de error disminuidos en la incertidumbre de calibración. Si no fuera así habría que estudiar las razones de esa desviación, y en su caso, ajustar el equipo, o tal vez proceder a su reparación.

De error por grado e temperatura, y una variación de temperatura obtenida como la máxima diferencia, entre la temperatura de calibración y la temperatura de la calibración actual. Se obtendrá la contribución a la incertidumbre $u(\delta_{Pcam})$:

$$U(\delta_{Pcam}) = \frac{C_o}{\sqrt{3}} \Delta t$$

Contribución a la incertidumbre debida a la resolución del equipo a calibrar $u(\delta_{Mres})$. La resolución se encuentra en el manual de especificaciones del fabricante del equipo y hay que expresarla como un tanto por ciento de la lectura. Esto podría venir en forma de tabla, si el equipo tiene varios rangos de medida. Se designa por el valor de resolución requerido, considerando la hipótesis de distribución rectangular:

$$U(\delta_{Mres}) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (37)$$

Contribución a la incertidumbre debida a la realización de la calibración a una temperatura diferente de la temperatura de referencia del medidor u (δ_{Mcam}). Su influencia en la incertidumbre será del tipo distribución rectangular. Teniendo como coeficiente de temperatura C_M (expresado en tanto por ciento de error por grado de temperatura) y una variación de temperatura Δt obtenida como el sema-intervalo de temperaturas durante la calibración. Se obtendrá la contribución a la incertidumbre u (δ_{Mcam}):

$$U(\delta_{Mcam}) = \frac{C_M}{\sqrt{3}} \Delta t$$

Contribución a la incertidumbre debida a la interpolación asociada a la corrección de las medidas del patrón de acuerdo con el certificado de calibración y esta sería, u (δ_{Pint}). A partir de los resultados del certificado de calibración del patrón se podrían corregir las medidas del patrón a través de una recta que se ajuste lo mejor posible a los valores obtenidos en la calibración (por ejemplo, un ajuste por mínimos cuadrados, ver anexo IV).

En este caso, la lectura del patrón se corregiría con el valor indicado por esta recta y se tendría una contribución a la incertidumbre que se podría estimar como la máxima desviación, en valor relativo, de cualquiera de los puntos del certificado de calibración con respecto a la recta D_{int} dividido por raíz de 3 si se considera la hipótesis de distribución rectangular, por tanto:

$$U(\delta_{Pint}) = \frac{D_{int}}{\sqrt{3}}$$

NOTA:

En el caso de que no se realicen correcciones a las indicaciones del patrón en función de los resultados de la calibración, esta contribución no se consideraría y se aplicaría lo indicado, esto es, a la incertidumbre, calculada a través de la ley de propagación de las varianzas según se indica en este apartado se sumaría el valor máximo de la corrección no realizada $U^* = U + C_{max}$

Podrían existir otras contribuciones (base de tiempos, frecuencia, forma de onda, etc....) pero normalmente serán despreciables si se siguen las indicaciones del procedimiento, para los patrones y equipos que son objeto del mismo normalmente.

La incertidumbre estándar, $u(y)$, asociada con la salida estimada viene dada por:

$$U(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n U^2(y)}$$

Dónde $U_j^2(y) = U^2(\delta_j)$

Ahora se trata de averiguar cuál es el factor de cobertura. Según el Anexo E de la referencia (13) hay que calcular primero los grados de libertad efectivos de $u(y)$ según:

$$v_{eft} = \frac{U^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{U^4(y)}{v_i}}$$

Teniendo en cuenta que para la incertidumbre de tipo A se tiene $v_j = n-1$, y para la de tipo B se podría hacer infinito si se han tomado precauciones a la hora de tomar los valores e la $u_j(y)$. Una vez hallado los grados de libertad efectivos se hará uso de la siguiente tabla, para un nivel de confianza del 95,45%:

Tabla V. Nivel de confianza del 95.45%

v_e	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.28	2.13	2.05	2.00

Finalmente, se calcula la incertidumbre expandida U como:

Tabla VI. Tolerancias extendidas

ENSAYOS	CLASE			
	0.2S	0.5S	0.5	1
5%Iref FP = 1	±0.4%	±1%	±1	-----
10%Iref FP = 1	±0.2%	±0.5%	±0.5%	±1.5%
100%Iref FP = 1	±0.2%	±0.5%	±0.5%	±3%
100%Iref FP = 0.5 ind	±0.3%	±0.6%	±0.8%	±3%
I _{max} ; FP = 1	±0.2%	±0.5%	±0.5%	±3%

$$U = k * u(y)$$

Que es incertidumbre de calibración del instrumento para un determinado nivel de confianza y un factor de cobertura k.

El resumen del análisis de incertidumbres sería:

Contribución a la incertidumbre debida a la calibración del patrón u(δP_{cal}). Como el patrón de referencia tiene un certificado de calibración externo en el que viene reflejada su incertidumbre de calibración expandida U_p indicando su nivel de confianza y el factor de cobertura, k, este dato se utilizara para hallar la:

$$U(\delta P_{cal}) = \frac{U_p}{k}$$

La U_p viene expresada en tanto por ciento, porque es costumbre expresar los errores en error relativo en las magnitudes eléctricas, a veces, los certificados de calibración incluyen. Además, el valor en absoluto, poniéndolo de la siguiente manera: $U_p = U_p \cdot 10^{-2} \cdot L_p$, en este caso se elegirá el valor U_p .

NOTA:

Aquí se considera incluida la resolución del patrón.

- Contribución a la incertidumbre debida a la deriva de las medidas del patrón u (δP_{der}). Esta se puede conocer con los resultados de calibraciones anteriores, se tendrá un historial del cual se calculara un valor

máximo de la deriva del error del patrón entre calibraciones D_{max} , por lo tanto, también estará en tanto por ciento. Haciendo de distribución rectangular:

$$U(\delta_{Pder}) = \frac{D_{max}}{\sqrt{3}}$$

NOTA:

La deriva también puede obtenerse considerando la regresión lineal (anexo IV) de los datos del historial.

Contribución a la incertidumbre debida a la realización de la calibración a una temperatura diferente de la temperatura de referencia del patrón $u(\text{pcam})$. Su influencia en la incertidumbre será del tipo distribución rectangular. Teniendo como coeficiente de temperatura C_o (expresado en tanto por ciento si in medidor es ajustado, la calibración hay que realizarla de nuevo, quedando en el certificado reflejado este hecho, dejando datos antes y después del ajuste; si estos ajustes son muy frecuentes, es posible, que el aparato necesite una reparación por parte de la casa fabricante.

La recalibración de un equipo se hará cuando el usuario del equipo lo estime conveniente; para decidirlo tendrá en cuenta el uso del medidor y los resultados obtenidos en las calibraciones anteriores. Un periodo de calibración normal para este tipo de equipos sería menos que lo indicado por el fabricante o por la especificación aplicable, no será necesario que el periodo de recalibración sea menor; en el caso de que supere dicha especificación habría que rebajar este periodo. Además si el medidor ha sido ajustado sería recomendable reducir el periodo de calibración a la mitad del periodo definido anteriormente.

4.7. Referencias

4.7.1. Documentación necesarios para realizar la calibración

Manual de funcionamiento del medidor de energía a calibrar.

Manual de funcionamiento del medidor de energía patrón.

Manual de funcionamiento del sistema de medida.

TABLA VI. Tamaño y composición de la muestra según el lote de medidores de energía que depende del país de construcción el año y modelo, y en el caso que el lote no alcance las nueve unidades tendrá que verificarse el 100% del lote

Tamaño del lote	Tamaño de la muestra (n)	Muestra alternativa	Constante de aceptación para ensayos de errores (k)	Numero de aceptación para marcha en vacío (c)
9 a 15	3	3	0.526	0
16 a 25	4	4	0.480	0
26 a 50	6	5	0.587	0
51 a 90	9	5	0.597	0
91 a 150	13	5	0.614	1
151 a 280	18	5	0.718	1
281 a 500	25	5	0.809	1
501 a 1200	35	7	0.912	1
1201 a 50000	50	10	0.947	2

CONCLUSIONES

1. La trazabilidad del patrón es importante que este documentada para que las verificaciones a los medidores de energía eléctrica sean verídicas y no se presenten problemas de un mal diagnóstico.
2. Los medidores electrónicos deben de tener la posibilidad de comunicación con una computadora mediante conexiones con cables o mediante una interfaz óptica, de tal forma que se pueda coleccionar información sin cortar presintos.
3. La verificación tiene que estar en el rango de error aceptable, ya que si están fuera de rango pueden tener mucha pérdida para la empresa que presta el servicio o al usuario, debido a que pueden exceder o disminuir lo establecido por el costo del kwh.
4. La verificación de los medidores de energía eléctrica se debe hacer en laboratorios certificados y con patrones que tengan trazabilidad comprobable, para que los resultados sean verídicos.

RECOMENDACIONES

1. Hacer un convenio con las empresas que prestan el servicio, para verificar una muestra significativa de un lote de medidores de energía eléctrica, para comprobar la veracidad de la calibración de estos.
2. Instalar los medidores en lugares adecuados para que no afecte los cambios de clima o que no estén completamente en la intemperie, ya que esto afecta la correcta calibración de medidores de energía eléctrica.
3. Tener siempre a la mano los manuales del patrón y medidores a la hora que se vaya a realizar una verificación de la calibración, como también evaluar que el laboratorio donde se toman las medidas esté con todas las medidas de seguridad y condiciones adecuadas para la medición tales como la temperatura, voltaje adecuado, corriente, resonancia acústica, etc.
4. Es necesario establecer si el punto de medición tiene una carga menor al 10%, pero se debe indicar que si una fase o las tres fases tienen el 10% de la corriente total instalada.
5. Hacer la revisión de los medidores con periodicidad y comprobar su calibración verídica para no afectar al usuario y a la empresa que presta el servicio

BIBLIOGRAFÍA

1. González López, Francisco. Metrología. Guatemala, 1998.
2. Marcobo Karcz, Andrés. Fundamentos de Metrología Eléctrica tomo III, Mexico, 1975.
3. Romero Mayoral, Jesús. Metrología, Universidad Politécnica de Canarias, 1986
4. Martínez, Enrique Telmo. Sistemas de gestión de un laboratorio de metrología eléctrica, volumen 5231 proyectos de fin de carrera, Universidad de Zaragoza Centro Politécnico Superior.
5. Procedimiento el 00-5 para la calibración de medidores de energía eléctrica, edición 0, Centro Español de Metrología.

ANEXOS

Anexo I.

Periodicidad de la verificación de los medidores

	Medidores de inducción clase 2	Medidores de inducción clase 1 y 0.5	Medidores de estado solido
Primera revisión de medidores nuevos a partir de su instalación	12 años	5 años	5 años
Revisiones posteriores	6 años	5 años	5 años

Anexo II.

Ejemplo de cálculo de la incertidumbre de calibración de un medidor

Se realiza la calibración de un medidor de energía eléctrica activa autorango por un sistema de medida de energía de la siguiente manera: El medidor posee una salida de pulsos proporcional a la cantidad de energía registrada, eso viene expresado mediante la constante del medidor $C = 0.00001 \text{Wh/pulso}$, el sistema de medida cuenta con un contador de pulsos e integra la medida en un tiempo predeterminado, ofreciendo, directamente, como resultado de la medición el error relativo en tanto por ciento, tal y como se indica en sección 4.4

Por un manual se sabe que tiene una variación máxima del error de 0.0250% siempre que las mediciones se tomen dentro de los valores siguientes:

Tensión: de 60V a 600V, con cambio automático de rango, con los rangos siguientes: 120V-240V-480V-600V

Intensidades de corriente: de 0.2A a 50.0A con cambio automático de rango, con los siguientes 0.2A-0.5A-5A-50A

Con factor de potencia entre 0 y 1

La temperatura ambiente entre 20C y 30C, fuera de esta temperatura y entre 0C y 50C tiene un coeficiente de temperatura $C_m=0.0001\%/C$ como máximo

Por el certificado de calibración del patrón se tiene:

$U_p=0.0050\%$ Con un nivel de confianza 95.45% con $k=2$ y una desviación máxima

$C_{max}=-0.0050\%$

Se eligen los valores que se consideran más idóneos y se obtiene la siguiente tabla:

N°	T(V)	I(A)	$\text{Cos}()$	$E_r\%$	\bar{q}	S(q)
1	240	5	1	-0.0081 -0.008 -0.0079 -0.008 -0.0068	-0.0078	0.0005
2	220	5	1	-0.008 -0.0063 -0.0065 -0.0064 -0.0079	-0.0070	0.0009
3	220	5	0.5ind	-0.0041 -0.0074 -0.0039 -0.0035 -0.0067	0.0051	0.0018
4	120	5	1	-0.0054 -0.0053 -0.0052 -0.0049 -0.0051	-0.0052	0-0002
5	120	5	0.8ind	-0.0061 -0.0079 -0.0063 -0.008 -0.008	-0.0073	0.0010
6	120	5	0.8cap	-0.0047 -0.0051 -0.0035 -0.0047 -0.003	-0.0042	0.0009
7	120	5	0.5ind	-0.006 -0.0055 -0.0087 -0.0088 -0.0087	-0.0075	0.0016
8	220	5	0.5ind	-0.0041 -0.0074 -0.0039 -0.0035 -0.0067	-0.0051	0.0018
9	120	5	0.5cap	-0.001 -0.001 -0.0008 0.0016 0.0016	0.0001	0.0014
10	120	2	1	-0.0069 -0.0069 -0.0078 -0.0072 -0.0066	-0.0071	0.0005
11	120	2	0.5ind	-0.0093 -0.0095 -0.0093 -0.0095 -0.0068	-0.0020	0.0012
12	120	1	0.5cap	-0.0025 0.0001 -0.0025 -0.0025 -0.0028	-0.0020	0.0012

La calibración se ha realizado entre 23°C y 23.3°C

Ahora se calcula la incertidumbre de calibración, teniendo en cuenta que todas las contribuciones han de estar en porcentaje con respecto a la lectura en cada punto.

- 1) Desviación estándar experimental:

$$U(E_r\%) = s(q) = 0.0018/\sqrt{5} = 0.0008\%$$

(Se ha tomado la $s(q)$ de mayor valor, aunque se podría haber hecho para cada punto de medida)

- 2) Según el certificado de calibración del sistema de medida de energía patrón utilizando se tiene $U_p = 0.0050\%$ con n nivel de confianza 95.45% con $K=2$

$$U(\delta_{pcal}) = U_p/K = 0.0025\%$$

- 3) Deriva del patrón. Se ha observado que $D_{max}/\sqrt{3} = 0.0001\%$
- 4) Como la calibración se ha hecho a la misma temperatura que la de referencia del patrón no habrá que considerarla
- 5) Resolución del equipo a calibrar. Puesto que la calibración se ha realizado por conteo de pulsos, la resolución tal y como viene definida en la sección 3 no es aplicable, ya que la indicación del visualizador no es tomada en cuenta. Aquí la resolución estará relacionado con el valor de un pulso, ya que es la mínima cantidad de la magnitud medida que se puede percibir de forma significativa durante la medición, y se sabe que cada pulso equivale a 0.00001Wh. lo que en todos los puntos de la calibración la contribución a la incertidumbre sea despreciable.

Si la resolución R se expresa en porcentajes: $R\% = \frac{R}{L_M} \times 100$ y la lectura

del medidor teóricamente es: $L_M = \frac{UI \cos \varphi}{3600} \times t$ se tomará $t=100s$ menos para los puntos 10 a 12 de la tabla.

- 6) Como la calibración se ha hecho dentro del margen de temperatura de referencia del medidor de energía no habrá que considerarla.
- 7) No se realiza correcciones a las indicaciones del patrón

La incertidumbre estándar:

$$U^2(Y) = 0.0008^2 + 0.0025^2 + 0.0001^2$$

$$u(y) = 0.0026$$

$$u_{eff} = \frac{0.0026^4}{\frac{0.0008^4}{4}} = 464,941$$

Entonces, según la tabla 1 de la sección 4.6.1 se tiene: K=2

La incertidumbre expandida, es U=0.0052% con K=2

Como no se ha realizado la corrección a las indicaciones del patrón se toma la $C_{max} = +0.0050\%$ quedando:

U=0.0102% con K=2 para un nivel de confianza del 95.45%

Magnitud	Esperanza matemática	Incertidumbre estándar U(Xi)	Coeficiente de sensibilidad Ci	Contribuciones a la incertidumbre
$E_r \%$	-0.0051	0.0008	1	0.0008
$\delta_{p_{cal}}$	0	0.0025	1	0.0025
$\delta_{p_{der}}$	0	0.0001	1	0.0001
E	-0.0051			0.0026

Anexo II. Medición de la energía por medio de las magnitudes de las que depende

Para la calibración de podría hacer suministrando al medidor una cantidad de energía conocida y comprobar el error que comete al medirla, teniendo en cuenta que:

$$W = VI \Delta t$$

Pero esto exigiría estar en posesión de un voltímetro y de un amperímetro de cualidades metrologicas bien conocidas y de una exactitud muy elevada. También sería necesario un cronómetro patrón para medir el periodo de tiempo para corriente alterna un fasímetro patrón, ya que sería

$$W = VI \cos \varphi \Delta t$$

$$W = VI \sin \varphi \Delta t$$

Las fuentes de tensión y de intensidad de corriente han de ser de una gran estabilidad, para poder asegurar que el valor de la energía calculado es semejante a la energía consumida.

Este método es recomendable sólo para medidores de alto nivel de exactitud en laboratorios que cuentan con grandes medios de medida.

Medición de la energía por medio de la potencia

Otra forma de calibrar un medidor de energía sería utilizando un vatímetro patrón y un cronometro patrón, este método sería muy similar al que se ha desarrollado en este procedimiento, con:

$$W = P \Delta t$$

Pero la desventaja es que el vatímetro nos da lecturas de potencia instantánea o de potencia media en un periodo de tiempo, pero no integra la potencia de cada instante, por tanto, habría que tener en cuenta que, si la potencia no resulta muy estable a lo largo del tiempo de la medida, el error calculado con la potencia media medida sería demasiado elevado para el medidor de energía.

Anexo III.

Ejemplos de definición de puntos de calibración

Ejemplo

Se tiene un medidor de energía eléctrica activa, monofásico, en corriente alterna clase 2 y se desea hacer una verificación de su exactitud. Se sabe que $I_b = 10 \text{ A}$ $I_{\max} = 40 \text{ A}$ $I_{\min} = 0.5 \text{ A}$, así que los puntos de medida serán a su tensión y frecuencia de referencia y para las siguientes intensidades:

N	U(V)	I(A)	Cosφ
1	240	5	1
2	240	5	0.5 inductivo
3	240	1	1
4	120	5	1
5	120	5	0.5 inductivo
6	120	5	0.5 capacitivo
7	120	1	1
8	120	1	0.5 inductivo
9	120	1	0.5 capacitivo
10	60	5	1
11	60	1	1
12	60	1	0.5 inductivo

Anexo IV.

Condiciones de referencia para medidores de inducción

Magnitudes de influencia	Valor de referencia	Tolerancias admisibles para los medidores de clase		
		0,5	1	2
Temperatura ambiente	Temperatura de referencia o en su ausencia, 23°C ¹⁾	± 1 °C	± 2 °C	± 2 °C
Tensión	Tensión nominal	±0,5 %	± 1 %	± 1 %
Frecuencia	Frecuencia nominal	± 0,2 %	± 0,3 %	± 0,5 %
Orden de fases	La indicada en el esquema de conexiones	-	-	-
Desequilibrio de tensiones	Todas las fases conectadas	-	-	-
Forma de onda	Tensiones e corrientes senoidales	Factor de distorsión inferior a		
		2 %	2 %	3 %
Inducción magnética a la frecuencia nominal	Inducción magnética igual a cero	Valor de inducción que provoca una variación de error no mayor que ³⁾		
		± 0,1 %	± 0,2 %	± 0,3 %
Funcionamiento de los accesorios	Sin accionar los accesorios	-	-	-
Posición de funcionamiento	Trabajo en posición vertical ²⁾	± 0,5°	± 0,5°	± 0,5°

Tomada del Reglamento Técnico y Metrológico para los medidores de energía eléctrica, página 75

Condiciones de referencia para medidores esataticos de clase 1 y 2

Magnitudes de influencia	Valor de referencia	Tolerancias admisibles para los medidores de clase	
		1	2
Temperatura ambiente	Temperatura de referencia o en su ausencia, 23°C ¹⁾	± 2 °C	± 2 °C
Tensión	Tensión nominal	± 1 %	± 1 %
Frecuencia	Frecuencia nominal	± 0,3 %	± 0,5 %
Orden de fases	La indicada en el esquema de conexiones	-	-
Desequilibrio de tensiones	Todas las fases conectadas	-	-
Forma de onda (componente continua, armónicas pares e impares y subarmónicas)	Tensiones e corrientes senoidales	Factor de distorsión inferior a	
		2 %	3 %
Inducción magnética continua de origen externo	Inducción magnética igual a cero	-	-
Inducción magnética a la frecuencia nominal	Igual a cero	Valor de la inducción que provoca una variación de error no mayor que ± 0,2 %	± 0,3 %

Tomada del Reglamento técnico y metrológico para los medidores de energía eléctrica, página 67