

**CONTADORES DE ESTADO SÓLIDO Y DIGITALES: ANÁLISIS DE LOS
ALGORITMOS DE MEDICIÓN DE ENERGÍA E ÍNDICES DE CALIDAD DE
ONDA QUE SE PUEDEN EVALUAR**

**OSCAR QUINTERO FRIAS
EDWARD YESID GAMEZ LAMUS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2004

**CONTADORES DE ESTADO SÓLIDO Y DIGITALES: ANÁLISIS DE LOS
ALGORITMOS DE MEDICIÓN DE ENERGÍA E ÍNDICES DE CALIDAD DE
ONDA QUE SE PUEDEN EVALUAR**

**OSCAR QUINTERO FRIAS
EDWARD YESID GAMEZ LAMUS**

TESIS DE PREGRADO

Director
Prof. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2004

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander, por el conocimiento adquirido durante los años de la preparación y por brindarnos la posibilidad de alcanzar un título que me acredita como profesional.

Al doctor Gabriel Ordóñez Plata, por el tiempo y la orientación prestada en la dirección de este proyecto. A todo el personal de la central de monitoreo de la Electrificadora de Santander, por su disponibilidad para brindar la información que requerimos para este estudio.

A nuestras familias, por el apoyo constante en el transcurso de la carrera y a DIOS por permitirnos alcanzar satisfactoriamente esta meta propuesta.

Dedicatoria

A mis padres Rosa y Emilio, a quienes debo todos mis éxitos, quienes siempre estuvieron ahí y con todos sus esfuerzos me hicieron un profesional.

A mis hermanos Nilson, Ober, Jackeline, Tatiana, Liliana, a mis sobrinos Diana, Daniela, Emily y en especial a Jorge Andrés, a él le debo esos momentos en que me hace sentir que para él soy una persona muy importante, eso me hace sentir una afortunado.

A mi novia Claudia, con su apoyo constante y por quien me ha motivado a dar lo mejor de mí.

A toda mi familia en general, a mis amigos, pero en especial lo dedico a mí mismo porque sé que estoy donde me propuse estar y con la alegría de alcanzar un sueño; el sueño de ser.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios por darme la vida y el ser, por permitirme ser un hombre de bien, con herramientas para continuar con una vida de esperanza y progreso.

A mi familia, a mi abuela por la paciencia y dedicación mostrados durante mi vida junto a ella, a mi hermano por el buen ejemplo que siempre me mostró y me seguirá mostrando, ejemplo el cual me condujo de una manera indirecta ha encontrarme hoy en día donde estoy, a mi mama por mostrarme que la vida esta llena de caídas y de momentos de crisis, que solo pueden ser abatidos si se cuenta con un fuerte objetivo “la familia”, a mi tía Elsa por el apoyo y la confianza depositados en mí y a todos mis amigos que influyeron positivamente en la formación de mi ser.

CONTENIDO

	pág
<u>INTRODUCCIÓN</u>	23
<u>1. ASPECTOS GENERALES SOBRE MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA</u>	26
<u>1.1 MEDIDORES DIGITALES DE ENERGÍA ELÉCTRICA UTILIZADOS POR LA ESSA E.S.P</u>	26
<u>1.2 FUNCIONALIDAD DE LOS MEDIDORES</u>	26
<u>1.2.1 Fronteras de generación</u>	27
<u>1.2.2 Fronteras de intercambio</u>	27
<u>1.2.3 Fronteras de control</u>	27
<u>1.2.4 Fronteras comerciales</u>	27
<u>1.2.5 Fronteras de circuitos y subestaciones</u>	28
<u>1.3 IMPORTANCIA DE LA MEDICIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA</u>	28
<u>1.3.1 Nivel de tensión a 13,2 kV y 34,5 kV</u>	29
<u>1.3.2 Nivel de tensión a 115 kV y 230 kV</u>	29
<u>1.4 REGLAMENTACIÓN Y NORMALIZACIÓN DE LAS MEDIDAS DE ENERGÍA EN COLOMBIA</u>	29
<u>1.4.1 Características del equipo y clase de medición</u>	30
<u>1.4.2 Requisitos generales</u>	31
<u>1.4.3 Contraste de las características de los equipos de medida de energía eléctrica instalados por la ESSA E.S.P con los requerimientos de la CREG 025/1999</u>	31

1.5	<u>CONEXIÓN DE TRASFORMADORES DE MEDIDA EN LOS USUARIOS DE LA ESSA E.S.P.</u>	32
2.	<u>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</u>	34
2.1	<u>DEFINICIONES GENERALES</u>	34
2.2	<u>EVALUACIÓN DE POTENCIAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS</u>	36
2.2.1	<u>Potencia instantánea</u>	36
2.2.2	<u>Potencia de dimensionamiento en sistemas con armónicos</u>	38
2.2.3	<u>Potencia activa en sistemas con armónicos</u>	39
2.2.4	<u>Potencia reactiva en sistemas con armónicos</u>	39
2.2.5	<u>Otras componentes de frecuencias en sistemas con armónicos</u>	40
2.3	<u>MODELO DE CZARNECKI DE POTENCIAS EN SISTEMAS TRIFÁSICOS CON COMPONENTES ARMÓNICAS</u>	41
2.4	<u>DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL</u>	45
3.	<u>EL MEDIDOR DIGITAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA</u>	47
3.1	<u>DESCRIPCIÓN GENERAL</u>	48
3.2	<u>PRINCIPIO DE OPERACIÓN</u>	48
3.3	<u>COMPONENTES DEL MEDIDOR DIGITAL</u>	49
3.3.1	<u>Etapa de adquisición de datos</u>	49
3.3.2	<u>Etapa de procesamiento de señales</u>	50
3.3.3	<u>Etapa de visualización</u>	51

<u>3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MEDIDOR DIGITAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA</u>	51
3.4.1 <u>Ventajas de los medidores digitales</u>	52
3.4.2 <u>Desventajas de los medidores digitales</u>	52
<u>3.5 MARCAS DE MEDIDORES DIGITALES DE ENERGÍA ELÉCTRICA COMÚNMENTE INSTALADAS EN COLOMBIA</u>	53
<u>3.6 ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN</u>	53
3.6.1 <u>Medidor ABB ref. ALPHA II</u>	54
3.6.1.1 <u>Estimación de la potencia activa</u>	54
3.6.1.2 <u>Estimación de la potencia de dimensionamiento</u>	55
3.6.1.3 <u>Estimación de la potencia reactiva</u>	55
3.6.1.4 <u>Estimación del factor de potencia</u>	55
3.6.1.5 <u>Estimación de potencias trifásicas</u>	56
3.6.2 <u>Medidor SIEMENS ref. S4</u>	56
3.6.2.1 <u>Estimación de la potencia activa</u>	56
3.6.2.2 <u>Estimación de la potencia reactiva</u>	57
3.6.2.3 <u>Estimación de la potencia de dimensionamiento</u>	57
3.6.2.4 <u>Estimación del factor de potencia</u>	57
3.6.2.5 <u>Estimación de potencias trifásicas</u>	58
3.6.3 <u>Medidor EMH ELGAMA ref. LZQM</u>	58
3.6.3.1 <u>Estimación de la potencia activa</u>	58

3.6.3.2	<u>Estimación de la potencia reactiva</u>	58
3.6.3.3	<u>Estimación de la potencia de dimensionamiento</u>	59
3.6.3.4	<u>Estimación del factor de potencia</u>	59
3.6.3.5	<u>Estimación de potencias trifásicas</u>	59
3.6.4	<u>Medidor SCHLUMBERGER ref. QUANTUM, FULCRUM y VECTRON</u>	59
3.6.4.1	<u>Estimación de la potencia activa</u>	59
3.6.4.2	<u>Estimación de la potencia reactiva</u>	59
3.6.4.3	<u>Estimación de la potencia de dimensionamiento</u>	60
3.6.4.4	<u>Estimación del factor de potencia</u>	60
3.6.4.5	<u>Estimación de potencias trifásicas</u>	60
3.7	<u>ANÁLISIS DE LOS ALGORITMOS</u>	60
3.7.1	<u>Algoritmos de estimación de la potencia activa</u>	60
3.7.2	<u>Algoritmos de estimación de la potencia reactiva</u>	61
3.7.3	<u>Algoritmos de estimación de la potencia de dimensionamiento</u>	63
3.8	<u>ÍNDICES DE CALIDAD DE ONDA</u>	64
4.	<u>SIMULACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE POTENCIAS DE LOS MEDIDORES DIGITALES</u>	66
4.1	<u>DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA</u>	67
4.1.1	<u>Entrada de datos</u>	67
4.1.2	<u>Procesamiento de datos</u>	71
4.1.3	<u>Resultados</u>	72
4.2	<u>CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA</u>	74

4.2.1	<u>Variables de programación</u>	75
4.2.2	<u>Resultados</u>	75
5.	<u>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN</u>	77
5.1	<u>POTENCIAS TRIFÁSICAS DE SISTEMAS DESBALANCEADOS Y CON RMÓNICOS</u>	77
5.1.1	<u>Sistema desbalanceado con carga resistiva</u>	77
5.1.2	<u>Sistema trifásico balanceado con carga no lineal</u>	79
5.2	<u>DATOS DE ENTRADA DE LAS SIMULACIONES</u>	80
5.2.1	<u>Escenario1</u>	80
5.2.1.1	<u>Sistema trifásico sin neutro</u>	81
5.2.1.2	<u>Sistema trifásico con neutro</u>	83
5.2.2	<u>Escenario 2</u>	86
5.3	<u>RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN</u>	89
5.3.1	<u>Resultados del escenario 1</u>	89
5.3.2	<u>Resultados del escenario 2</u>	90
5.4	<u>COMPARACIÓN DE RESULTADOS</u>	92
5.4.1	<u>Errores de estimación de la potencia activa</u>	103
5.4.2	<u>Errores de estimación de la potencia reactiva</u>	104
5.4.3	<u>Errores de estimación de la potencia de dimensionamiento</u> ...	105

5.4.4	<u>Factor de potencia</u>	106
5.5	<u>DATO USUARIO DE LA ESSA E.S.P.</u>	107
	<u>CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES</u>	112
	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	116
	<u>ANEXO A</u>	118
	<u>ANEXO B</u>	121

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. <u>Clase del equipo de medida</u>	30
Tabla 2. <u>Sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado</u>	81
Tabla 3. <u>Sistema trifásico desbalanceado con armónicos de tensión y corriente</u>	82
Tabla 4. <u>Sistema trifásico balanceado con armónicos de tensión y corriente</u> ..	83
Tabla 5. <u>Sistema trifásico balanceado con armónicos de corriente</u>	84
Tabla 6. <u>Sistema trifásico desbalanceado con contenido de armónicos en tensión y corriente y carga no lineal (computadores)</u>	85
Tabla 7. <u>Sistema trifásico de una única frecuencia desbalanceado y medidor conectado en conexión Aron</u>	86
Tabla 8. <u>Sistema trifásico balanceado con armónicos en corriente y medidor conectado en Aron</u>	87
Tabla 9. <u>Sistema trifásico desbalanceado con contenido de armónicos en tensión y corriente (carga no lineal) y medidor conectado en conexión Aron</u> ..	88
Tabla 10. <u>Potencias eléctricas de sistemas trifásicos sin neutro (tres hilos)</u>	89
Tabla 11. <u>Potencias eléctricas de sistemas trifásicos con neutro (cuatrohilos)</u> ..	90
Tabla 12. <u>Potencias eléctricas obtenidas en simulación considerando la conexión Aron</u>	91
Tabla 13. <u>Resultados de la teoría de Czarnecki</u>	93
Tabla 14. <u>Errores porcentuales en el escenario 1</u>	93
Tabla 15. <u>Errores porcentuales del escenario 2 (conexión Aron)</u>	97
Tabla 16. <u>Resultados de potencias para un sistema con las tres fases sensadas</u>	108
Tabla 17. <u>Consumo de potencia eléctrica de un cliente no regulado</u>	110

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. <u>Potencia instantánea</u>	38
Figura 2. <u>Diagrama fasorial de corrientes</u>	44
Figura 3. <u>Bloques básicos de un medidor digital de energía eléctrica</u>	49
Figura 4. <u>Etapas del procesamiento de señales</u>	51
Figura 5. <u>Estructura del programa</u>	67
Figura 6. <u>Ingreso del valor de tensión rms de la señal correspondiente a la frecuencia fundamental</u>	68
Figura 7. <u>Ingreso del valor de corriente rms de la señal correspondiente a la frecuencia fundamental</u>	68
Figura 8. <u>Ingreso del valor de la frecuencia fundamental (Hz)</u>	68
Figura 9. <u>Ingreso del orden de los armónicos presentes en la correspondiente señal, con su correspondiente magnitud en porcentaje y ángulo en grados</u>	69
Figura 10. <u>Ingreso del orden de la mayor componente armónica de tensión por fase</u>	69
Figura 11. <u>Ingreso del orden de la mayor componente armónica de corriente por fase</u>	69
Figura 12. <u>Ingreso del orden de la mayor componente armónica de corriente por fase</u>	70
Figura 13. <u>Ingreso del orden de la componente armónica de corriente, su magnitud y ángulo por fase</u>	70
Figura 14. <u>Ingrese el número correspondiente al medidor que desea simular</u>	72
Figura 15. <u>Ecuaciones de las señales de tensión de entrada con sus correspondientes índices de distorsión armónica total por fase</u>	72
Figura 16. <u>Ecuaciones de las señales de corriente de entrada con sus correspondientes índices de distorsión armónica total por fase</u>	73

Figura 17. <u>Señales de tensión y corriente de entrada</u>	73
Figura 18. <u>Valores de las potencias activa, reactiva y dimensionamiento</u>	74
Figura 19. <u>Sistema trifásico en Δ</u>	77
Figura 20. <u>Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado</u>	81
Figura 21. <u>Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico desbalanceado con armónicos de tensión y corriente</u>	82
Figura 22. <u>Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico balanceado con armónicos de tensión y corriente</u>	83
Figura 23. <u>Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico balanceado con armónicos de corriente</u>	84
Figura 24. <u>Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico desbalanceado con contenido de armónicos en tensión y corriente y carga no lineal (computadores)</u>	85
Figura 25. <u>Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico de una única frecuencia desbalanceado y considerando conexión Aron en el medidor tomando como referencia la fase T ($I_T = 0$)</u>	87
Figura 26. <u>Tensión y corriente en el medidor digital de un sistema trifásico desbalanceado con armónicos de tensión y corriente considerando la conexión Aron en el medidor y tomando como referencia para la conexión la fase T ($I_T = 0$)</u>	88
Figura 27. <u>Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico balanceado con armónicos en tensión y corriente y considerando conexión Aron en el medidor y tomando como referencia para la conexión la fase T ($I_T = 0$)</u>	89
Figura 28. <u>Errores porcentuales de un sistema trifásico de una única frecuencia desbalanceado</u>	95
Figura 29. <u>Errores porcentuales de un sistema trifásico balanceado con armónicos de corriente</u>	95
Figura 30. <u>Errores porcentuales de un sistema trifásico desbalanceado de cuatro hilos con armónicos comunes de tensión y corriente</u>	96

Figura 31. <u>Errores porcentuales de un sistema trifásico balanceado de cuatro hilos con armónicos comunes de tensión y corriente</u>	96
Figura 32. <u>Errores porcentuales de un sistema de una única frecuencia y desbalanceado (ref. fase R)</u>	99
Figura 33. <u>Errores porcentuales de un sistema de una única frecuencia y desbalanceado (ref. fase S)</u>	99
Figura 34. <u>Errores porcentuales de un sistema de una única frecuencia y desbalanceado (ref. fase T)</u>	100
Figura 35. <u>Errores porcentuales de un sistema trifásico balanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase R)</u>	100
Figura 36. <u>Errores porcentuales de un sistema trifásico balanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase S)</u>	101
Figura 37. <u>Errores porcentuales de un sistema trifásico balanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase T)</u>	101
Figura 38. <u>Errores porcentuales de un sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase R)</u>	102
Figura 39. <u>Errores porcentuales de un sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase S)</u>	102
Figura 40. <u>Errores porcentuales de un sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase T)</u>	106
Figura 41. <u>Visualización de lectura del medidor EMH-ELGAMA</u>	111
Figura 42. <u>Esquema de medición con 3 PTs y 3 CTs</u>	118
Figura 43. <u>Esquema de medición con 2 PTs y 2 CTs (Conexión Aron)</u>	119

TABLA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. <u>Métodos de conexión para transformadores de medida</u>	117
Anexo B. <u>Programa de simulación de algoritmos de medidores digitales de energía eléctrica</u>	120

TITULO:
**CONTADORES DE ESTADO SÓLIDO Y DIGITALES: ANÁLISIS DE LOS
ALGORITMOS DE MEDICIÓN DE ENERGÍA E ÍNDICES DE CALIDAD DE
ONDA QUE SE PUEDEN EVALUAR***

Autores:
Edward Yesid Gamez L. & Oscar Quintero Frias**

Hoy en día, los avances en la electrónica de potencia y el sin número de aplicaciones de dispositivos de este tipo en cargas eléctricas residenciales e industriales como: variadores de velocidad, conversores de potencia, equipos de control, etc., además de los efectos electromagnéticos como la saturación del núcleo de un transformador, el uso de equipos que basan su funcionamiento en la creación de arcos, etc. conllevan a la generación de armónicos (señales con frecuencias diferentes a 60 Hz). La aparición de señales con frecuencias diferentes a 60 Hz, contribuyen a la distorsión de las formas de onda de tensión y corriente.

Debido a esto, es necesario establecer definiciones de potencia y métodos de medición de éstas que tengan en cuenta estos aspectos. La utilización de instrumentos digitales en el campo de las mediciones eléctricas permite tener en cuenta estas nuevas condiciones de los sistemas eléctricos y de las señales asociadas a ellos (tensión y corriente). Sin embargo, en muchos casos los algoritmos utilizados para la medición de potencia y energía parten de supuestos que muchas veces no se presentan, haciendo que las estimaciones de potencia especialmente las potencias reactiva y de dimensionamiento se obtengan con errores superiores a los especificados por la clase del equipo de medición.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Ingeniería Eléctrica, Gerardo Latorre Bayona.

Ante esta situación, en este proyecto se realiza un análisis de los algoritmos utilizados en medidores digitales de energía eléctrica (específicamente los medidores utilizados en la Empresa Electrificadora de Santander S.A E.S.P) para establecer si las estimaciones de energía para diferentes características de las señales de tensión y corriente son adecuadas y están dentro de las especificaciones de la clase del instrumento de medición.

TITLE:
**DIGITAL AND ELECTRONIC METERS: ANALYSIS OF THE ENERGY
MEASUREMENT ALGORITHMS AND WAVE'S QUALITY INDEXES
THAT CAN BE EVALUATED***

Authors:
Edward Yesid Gamez L. & Oscar Quintero Frias**

Today, the advances in power electronics and the numerous applications of devices as “power converter”, “control’s devices”, etc. in residential and industrial electrical charges, besides the electromagnetic effects as nucleus saturation of transformer; the usage of devices that base its function in the creation of arcs, bear the harmonics generation (signals with frequencies different than 60 Hz). The appear of signal with frequencies different than 60 Hz, contribute to the tension and current wave’s distortion forms.

Because that, it’s necessary to establish definitions of potencies and methods of measure that consider the mentioned aspects. The usages of digital devices in the measurement electric’s area allow consider these new conditions of the electric systems and the signal associates to them (tension and current). Nevertheless, in many cases the used algorithms for the potency and energy measurement leaves from assumptions that often does not appear, causing that the potency estimations, reactive potencies specially and dimension potencies will be obtain with superior errors to those specified by the measurement device.

In front of this situation, this project makes an analysis of the algorithms used in digital meters of electric power (specifically the meters used in the “Empresa Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.) to establish if the energy estimates for

* Grade Effort

** Phisique-mechanic engineering faculty, Electrical engineering, Gerardo Latorre Bayona.

different characteristics of tension and current's signals are adequate and are inside of the device measurement's class.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los avances en la electrónica de potencia y el sin número de aplicaciones de dispositivos de este tipo en cargas eléctricas residenciales e industriales como: variadores de velocidad, conversores de potencia, equipos de control, etc., además de los efectos electromagnéticos como la saturación del núcleo de un transformador, el uso de equipos que basan su funcionamiento en la creación de arcos, etc. conllevan a la generación de armónicos (señales con frecuencias diferentes a 60 Hz). La aparición de señales con frecuencias diferentes a 60 Hz, contribuyen a la distorsión de las formas de onda de tensión y corriente.

Debido a esto, es necesario establecer definiciones de potencia y métodos de medición de éstas que tengan en cuenta estos aspectos. La utilización de instrumentos digitales en el campo de las mediciones eléctricas permite tener en cuenta estas nuevas condiciones de los sistemas eléctricos y de las señales asociadas a ellos (tensión y corriente). Sin embargo, en muchos casos los algoritmos utilizados para la medición de potencia y energía parten de supuestos que muchas veces no se presentan, haciendo que las estimaciones de potencia especialmente las potencias reactiva y de dimensionamiento se obtengan con errores superiores a los especificados por la clase del equipo de medición.

Ante esta situación, en este proyecto se realiza un análisis de los algoritmos utilizados en medidores digitales de energía eléctrica (específicamente los medidores utilizados en la Empresa Electrificadora de Santander S.A E.S.P) para establecer si las estimaciones de energía para diferentes características de las señales de tensión y corriente son adecuadas y están dentro de las especificaciones de la clase del instrumento de medición.

Los resultados de este estudio son presentados en este documento, el cual se ha organizado por capítulos. El contenido de cada uno de estos capítulos se detalla a continuación.

En el primer capítulo se realiza un análisis de los contadores utilizados por ESSA E.S.P en sus fronteras comerciales con clientes no regulados, cuyo objetivo es identificar las marcas de los medidores instalados en los diferentes niveles de tensión y verificar si éstos cumplen con la normalización y reglamentación de medidas de energía en Colombia.

En el segundo capítulo se presenta un resumen de las definiciones generales de potencia eléctrica teniendo en cuenta que las ondas de tensión y corriente tienen componentes armónicas.

Las características de los equipos de medición de energía eléctrica digitales y los algoritmos utilizados por estos equipos para estimar las diferentes energías eléctricas son descritos en el capítulo 3.

La plataforma de simulación desarrollada para evaluar el comportamiento de los medidores digitales de energía eléctrica es presentada en el capítulo 4. Esta simulación considera los diferentes algoritmos utilizados en la estimación de potencias en los medidores digitales teniendo en cuenta las características de las señales de tensión y corriente.

En el capítulo 5 se comparan los valores de las potencias eléctricas activa, reactiva y de dimensionamiento (aparente) obtenidos en la simulación de las mediciones eléctricas de los diferentes medidores analizados. Esta comparación permite establecer cuales mediciones de energía eléctrica son realizadas adecuadamente y establecer los errores probables en los procesos de medición.

Finalmente el documento presenta las conclusiones y observaciones más relevantes de este trabajo, así como los futuros desarrollos en este campo.

1. ASPECTOS GENERALES SOBRE MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Debido a la aparición de armónicos en los sistemas de distribución, y a los efectos que estos conllevan en las mediciones de potencia y energía, es necesario analizar los algoritmos implementados en medidores digitales de energía para cuantificar la energía eléctrica demandada por un sistema eléctrico. Este estudio permitirá establecer si la clase de los equipos digitales de medición de energía se mantiene cuando hay distorsiones en las formas de onda de las señales de tensión y corriente y desbalances en los sistemas trifásicos. El análisis se realizará con los contadores utilizados por la Empresa Electrificadora de Santander (ESSA E.S.P) en sus fronteras comerciales con clientes no regulados.

1.1 MEDIDORES DIGITALES DE ENERGÍA ELÉCTRICA UTILIZADOS POR LA ESSA E.S.P

Los medidores digitales de energía eléctrica utilizados por la ESSA E.S.P, son de las siguientes marcas y referencias:

- ABB ref. ALPHA II
- SIEMENS ref. S4
- EMH-ELGAMA ref. LZQM
- SCHLUMBERGER ref. QUANTUM, FULCRUM y VECTRON

1.2 FUNCIONALIDAD DE LOS MEDIDORES

Antes de describir la ubicación y la importancia que tienen los registros de los medidores digitales de energía eléctrica o de estado sólido instalados por la ESSA E.S.P, se definen varios parámetros que se utilizarán en este documento y que son importantes en la estructuración que tiene el sistema de medidas de esta empresa.

1.2.1 Fronteras de generación. Son puntos externos ubicados en el perímetro del sistema eléctrico de la ESSA E.S.P, destinados a registrar la energía que se recibe de las centrales generadoras. Con ellos se busca establecer la relación entre oferta y demanda, y específicamente la energía que la empresa compra a los generadores. La medición de energía en esta frontera se lleva a cabo a niveles de tensión de 230 kV y 115 kV. Estos puntos corresponden a las principales subestaciones de la ESSA E.S.P, como son Palos, Barranca, Bucaramanga, etc. En esta frontera se tienen instalados medidores digitales de la marca SCHLUMBERGER de las referencias QUANTUM, FULCRUM y VECTRON, los cuales tienen una clase 0,2.

1.2.2 Fronteras de intercambio. Estos puntos tienen la misma ubicación de las fronteras de generación, pero a diferencia de estas, las fronteras de intercambio son definidas para registrar tanto la energía que recibe la ESSA E.S.P como la que sale de la misma. Esto se hace debido a que el flujo de energía por las líneas de transmisión no tiene una sola dirección. La toma de medidas en esta frontera se lleva a cabo a niveles de tensión de 230 kV y 115 kV. En esta frontera se tienen instalados medidores digitales de la marca SCHLUMBERGER de las referencias QUANTUM, FULCRUM y VECTRON.

1.2.3 Fronteras de control. Son puntos estratégicos de la ESSA E.S.P destinados a controlar el flujo de energía por los distintos circuitos, con la finalidad de llevar a cabo balances de energía eléctrica en éstos, para obtener el porcentaje equivalente a las pérdidas de energía. La toma de medidas en esta frontera se lleva a cabo a un nivel de tensión de 34,5 kV. En esta frontera se tienen instalados medidores digitales de la marca EMH-ELGAMA con referencia LZQM, y de clase 0,5.

1.2.4 Fronteras comerciales. Son todos aquellos puntos donde los clientes de la empresa y de las demás comercializadoras de energía eléctrica se conectan a la red

eléctrica de la ESSA E.S.P. La medida de energía eléctrica en esta frontera se realiza a niveles de tensión de 34,5 kV y 13,2 kV. En esta frontera se tienen instalados medidores digitales de la marcas ABB con referencia ALPHA II y clase 0,5, SIEMENS con referencia S4 y clase 0,5, EMH-ELGAMA con referencia LZQM y SCHLUMBERGER con referencia QUANTUM y clase 0,2.

1.2.5 Fronteras de circuitos y subestaciones. Estos puntos están ubicados en las cabeceras de los circuitos que parten de las subestaciones. Con la instalación de medidores en esta frontera se obtiene el consumo total del circuito y con ello se puede llevar a cabo el balance de energías para establecer las perdidas de energía eléctrica en el alimentador. La medición de energía eléctrica en esta frontera se lleva a cabo a niveles de tensión de 34,5 kV y 13,5 kV. En esta frontera se tienen instalados medidores digitales de la marca EMH-ELGAMA con referencia LZQM.

1.3 IMPORTANCIA DE LA MEDICIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Los medidores de energía eléctrica instalados por la Electrificadora de Santander, en las fronteras definidas previamente, permiten medir tanto la energía eléctrica consumida por los usuarios de la empresa como realizar el control de perdidas de energía en sus circuitos de distribución. Adicionalmente estos equipos permiten verificar la energía reportada por las demás comercializadoras al centro nacional de despacho (CND) y establecer un balance de si la energía consumida por la ESSA E.S.P es similar a la facturada.

La clase de los medidores de energía utilizados por la empresa depende del nivel de tensión en el cual se vayan a instalar y están especificados por normas técnicas colombianas (NTC 2147, 4052 y 4569-2) y decretos reglamentarios de la CREG (CREG-025 de 1995).

A continuación se describirá la importancia de la medida de energía a los diferentes niveles de tensión.

1.3.1 Nivel de tensión a 13,2 kV y 34,5 kV. Estos niveles de tensión se conocen como nivel 3 y corresponde básicamente a los niveles de tensión a los cuales se realiza la transmisión regional y la distribución local de energía. La energía eléctrica medida a estos niveles de tensión, corresponde a la energía entregada a clientes residenciales, comerciales o industriales regulados y no regulados, y a algunas comercializadoras de energía que tienen clientes no regulados o regulados en los circuitos de distribución de la ESSA E.S.P. En estos niveles de tensión, los clientes no regulados tienen instalados medidores digitales; así mismo la ESSA E.S.P instala en las fronteras comerciales medidores digitales de energía con el fin de realizar balances de energía para establecer las pérdidas de energía en sus circuitos.

1.3.2 Nivel de tensión a 115 kV y 230 kV. A estos niveles de tensión (nivel 2), los circuitos transportan la mayor cantidad de energía eléctrica que fluye por los circuitos de la ESSA E.S.P. Es por esta razón que la exactitud y precisión del equipo de medida de energía eléctrica instalado a estas tensiones debe ser alta, por lo que se requieren medidores de clase 0,2 para el área de comercialización y 0,5 para realizar balances de energía para establecer las perdidas de energía en los alimentadores.

1.4 REGLAMENTACIÓN Y NORMALIZACIÓN DE LAS MEDIDAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

En Colombia las condiciones técnicas y procedimientos que se deben tener en cuenta para efectos de toma de lectura, registros y recolección, actividades necesarias para la contabilización de las transacciones de energía eléctrica en el mercado mayorista son establecidas por la Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG) mediante la resolución CREG-025 de 1995 correspondiente al código de medida.

La reglamentación del código de medida sólo establece los aspectos a tener en cuenta en la medición para efectos comerciales y no tiene en cuenta los aspectos operativos, los cuales están establecidos en los códigos de conexión, de operación y en sus respectivos anexos.

En el código de medida se especifican las características técnicas que deben cumplir los equipos de medición, de telecomunicaciones y de respaldo asociados, así como los procedimientos de instalación, pruebas, certificación, operación y mantenimiento¹.

1.4.1 Características del equipo y clase de medición. La clase de los aparatos utilizados para la medición de energía activa y reactiva (CTs, PTs y medidores digitales) para los efectos que establece el código de medida y que solo conciernen al mercado mayorista, son presentados en la tabla 1 con base en el nivel de tensión en el cual está instalado el equipo de medida y que corresponde al valor de la clase aceptado.

Tabla 1. Clase del equipo de medida

INSTALACIÓN	CTs	PTs	MEDIDOR
Fronteras con tensiones mayores o iguales a 110 kV, ó transferencias medias horarias mayores o iguales a 20 MWh.	0,2	0,2	0,2
Fronteras con tensiones menores a 110 kV, ó transferencias medias horarias menores a 20 MWh. Servicios auxiliares.	0,5	0,5	0,5

¹ COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. CÓDIGO DE REDES: Código de medida. Santa Fe de Bogotá: CREG, 1995. p. 138. : il. (CREG 025).

CTs: Transformadores de corriente

PTs: Transformadores de tensión

1.4.2 Requisitos generales. A continuación se presentan los requisitos más importantes que deben presentar los equipos de medida instalados en Colombia²:

- Los medidores electrónicos deberán ser trifásicos y calcular en forma directa y fiel la energía de cada una de las tres fases, con emisores de impulso a tres hilos libres de potencial, dispositivo antirretroceso e indicador numérico de energía medida.
- Los medidores de clase 0,2 y 0,5s deberán ser de tipo estático.
- Los contadores principales de cada frontera comercial (según la definición de frontera comercial de la CREG) deberán disponer de registradores tanto para la energía activa como reactiva, los cuales obtienen y almacenan en forma permanente los valores de estas energías.
- El equipo estará dotado de un módem de datos y la programación necesaria para la comunicación, con el grado de protección y confiabilidad requerido. Adicionalmente, dispondrá de la posibilidad de adquisición local de la información en papel y en medio magnético (discos).
- Como referencia de tiempo los registradores utilizarán una base de tiempo propia, previéndose la disponibilidad de sincronización externa remota de los mismos desde el CND.

1.4.3 Contraste de las características de los equipos de medida de energía eléctrica instalados por la ESSA E.S.P con los requerimientos de la CREG 025/1999. Los medidores de energía eléctrica y los transformadores de medida

² COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. CÓDIGO DE REDES: Código de medida. Santa Fe de Bogotá: CREG, 1995. p. 138-139. : il. (CREG 025)

(CTs y PTs) instalados por la ESSA E.S.P en sus fronteras comerciales, de control, de circuitos y subestaciones, fronteras de generación y de intercambio (estas dos últimas definidas por la CREG 025/1999 como fronteras comerciales) cumplen con la clase requerida mostrada en la tabla 1 y con los demás ítems mencionados ...en el numeral 1.4.2...

En general, los equipos de medida de energía eléctrica utilizados por la ESSA E.S.P en sus diferentes fronteras cumplen con los requerimientos del código de medida y con las especificaciones de las normas técnicas colombianas 2147, 4052 y 4569-2.

1.5 CONEXIÓN DE TRASFORMADORES DE MEDIDA EN LOS USUARIOS DE LA ESSA E.S.P

La conexión de los transformadores de medida utilizados por la ESSA E.S.P presentan diferencias entre si. Se tienen dos tipos de conexiones las cuales están sujetas a requerimientos y normalizaciones establecidas por la CREG en la resolución CREG 025 de 1995 y por criterio propio de la empresa electrificadora, donde la CREG no especifica el tipo de conexión para clientes no regulados. Los requerimientos de la CREG están orientados principalmente hacia el mercado mayorista mientras que los de la empresa electrificadora lo hace hacia sus clientes no regulados.

La CREG establece un tipo de conexión para el mercado mayorista, el cual debe sensar cada una de las tres fases, lo cual indica que se debe instalar un PT y CT para cada una de ellas. El segundo tipo de conexión corresponde a la conexión Aron, la cual consta de dos PTs y dos CTs. Se opta por este tipo de conexión, mas por aspectos económicos que por operativos. Las dos conexiones pueden incurrir en errores mayores en el proceso de medición a las establecidas por la clase del equipo

de medición, específicamente en la estimación de las potencias reactiva y de dimensionamiento del sistema trifásico.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La gran mayoría de los conceptos utilizados hasta ahora en la medición de potencia eléctrica (potencia aparente (S), potencia activa (P), potencia reactiva (Q)) consideran que las ondas de tensión y corriente son sinusoidales de única frecuencia (60 Hz) y que las cargas conectadas están balanceadas en el caso de sistemas trifásicos. En este capítulo se presentará un resumen de las definiciones generales de potencia eléctrica teniendo en cuenta que las ondas de tensión y corriente tienen componentes armónicas³.

2.1 DEFINICIONES GENERALES

Algunas de las definiciones utilizadas en el análisis de sistemas eléctricos se presentan a continuación.

Valor eficaz: El valor eficaz de una señal periódica (tensión o corriente) es una medida de su eficacia para entregar potencia a una carga resistiva. El concepto de valor eficaz se basa en tener una tensión o una corriente alterna que entregue a una resistencia, la misma potencia promedio que una tensión o corriente continua equivalente entregaría. El valor eficaz también recibe el nombre de valor efectivo o valor rms (del inglés **root-mean-square**, raíz media cuadrática) y se define como.

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T v^2(t) dt} \quad (1)$$

³ PETIT SUAREZ, Johann Farit y USTARIZ FARFAN, Armando Jaime. Análisis general de armónicos: revisión de las definiciones de potencia. Bucaramanga, 1997. p. 23. Tesis de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas.

Potencia instantánea: La potencia instantánea esta definida como el producto en el tiempo entre las señales de tensión y corriente:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2)$$

Potencia aparente (potencia de dimensionamiento): Se define como el producto entre el valor eficaz de la onda de tensión y el valor eficaz de la onda de corriente de un sistema eléctrico y su valor indica el dimensionamiento del sistema. Por ser un escalar, no proporciona información acerca de la dirección del flujo de energía. Se expresa como:

$$S = V \cdot I \quad (3)$$

La potencia aparente se relaciona con las potencias activa y reactiva mediante la expresión:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

Potencia activa: Es la potencia asociada con el trabajo útil realizado en un sistema, que para los sistemas eléctricos corresponde a la potencia disipada en los elementos resistivos. La potencia activa representa la potencia promedio entregada a una carga en estado estacionario y se define como el valor promedio de la potencia instantánea:

$$P = \frac{1}{T} \int_T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_T v(t) \cdot i(t) dt \quad (5)$$

Siendo T el periodo fundamental de las señales de tensión y corriente.

Potencia reactiva: Es la potencia asociada a la magnetización o polarización de los materiales en el caso de sistemas con señales sinusoidales de una única frecuencia. Esta potencia no realiza un trabajo útil, pero sin embargo se debe tener en cuenta en el dimensionamiento de un sistema eléctrico ya que el sistema la requiere para su

funcionamiento. En sistemas con formas de ondas no sinusoidales, esta potencia tienen en cuenta todos aquellos efectos que aumentan el dimensionamiento del sistema sin producir un trabajo útil, por cual se debe expresar como:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (6)$$

Factor de potencia: El factor de potencia es la relación entre la potencia activa P y la potencia aparente S y es una medida del rendimiento de un sistema eléctrico:

$$F.P. = \frac{P}{S} \quad (7)$$

2.2 EVALUACIÓN DE POTENCIAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

Una vez definidas las potencias en sistemas eléctricos, se presentará la forma de evaluar cada una de ellas considerando que las ondas de tensión y corriente presentan componentes armónicas, es decir que cada señal esta conformada por la combinación lineal de componentes armónicamente relacionadas.

2.2.1 Potencia instantánea. Considerando que las señales de tensión y corriente tienen M (ecuación 8) y N (ecuación 9) componentes armónicas, y reemplazando las ecuaciones 8 y 9 en la ecuación 2, se obtiene la una expresión general para la potencia instantánea⁴. Es decir que si la tensión y la corriente son iguales a:

$$v(t) = \sum_{k=1}^M \sqrt{2}V_k \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (8)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2}I_k \cos(k\omega t + \alpha_k + \theta_k) \quad (9)$$

Y considera que $N > M$, la potencia instantánea se puede expresar como:

⁴ MAKRAM, Elham B. *et al.* Effect of harmonic distortion in reactive power measurement. IEEE Transactions on industry applications, Vol 28, No 4, julio/agosto, 1992.

$$\begin{aligned}
p(t) = & \sum_{k=1}^M V_k I_k \cos \theta_k (1 + \cos(2k \omega t + 2 \alpha_k)) \\
& - \sum_{k=1}^N V_k I_k \sin \theta_k \sin (2k \omega t + 2 \alpha_k) \\
& + \sum_{r=1}^M \sum_{\substack{k=1 \\ r \neq k}}^N V_r I_k \cos \theta_k \{ \cos ((r-k) \omega t + (\alpha_r - \alpha_k)) + \cos ((r+k) \omega t + (\alpha_r + \alpha_k)) \} \\
& - \sum_{r=1}^M \sum_{\substack{k=1 \\ r \neq k}}^N V_r I_k \sin \theta_k \{ \sin ((r+k) \omega t + (\alpha_r + \alpha_k)) - \sin ((r-k) \omega t + (\alpha_r - \alpha_k)) \} \quad (10)
\end{aligned}$$

En esta ecuación se observa que la potencia instantánea se puede dividir en cuatro términos: Uno correspondiente a una señal de continua (potencia activa), otros términos con frecuencias iguales al doble de la frecuencia de las señales y ortogonales entre si y un último término conocido como potencia de distorsión.

Para el caso de un sistema eléctrico con una única frecuencia, se puede expresar la potencia instantánea como⁵:

$$p(t) = P - P \cos (2\omega t) + Q \cdot \sin (2\omega t) \quad (11)$$

Donde P corresponde a la potencia activa y Q se denomina para este caso potencia reactiva:

$$P = V \cdot I \cos \theta \quad (12)$$

$$Q = V \cdot I \sin \theta \quad (13)$$

Siendo θ el ángulo entre la tensión y la corriente.

⁵ PETIT SUAREZ, Johann Farit y USTARIZ FARFAN, Armando Jaime. Análisis general de armónicos: revisión de las definiciones de potencia. Bucaramanga, 1997. p. 62. Tesis de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas.

Como se muestra en la figura 1, la potencia instantánea para este caso tiene dos componentes con frecuencias el doble de la frecuencia de las señales de tensión y corriente. La potencia instantánea se puede dividir en dos potencias: una correspondiente a la señal alterna $P - P \cdot \cos(2\omega t)$ con valor medio P y otra representada por la señal $Q \cdot \sin(2\omega t)$; donde el valor máximo de esta componente (Q) se denomina potencia reactiva.

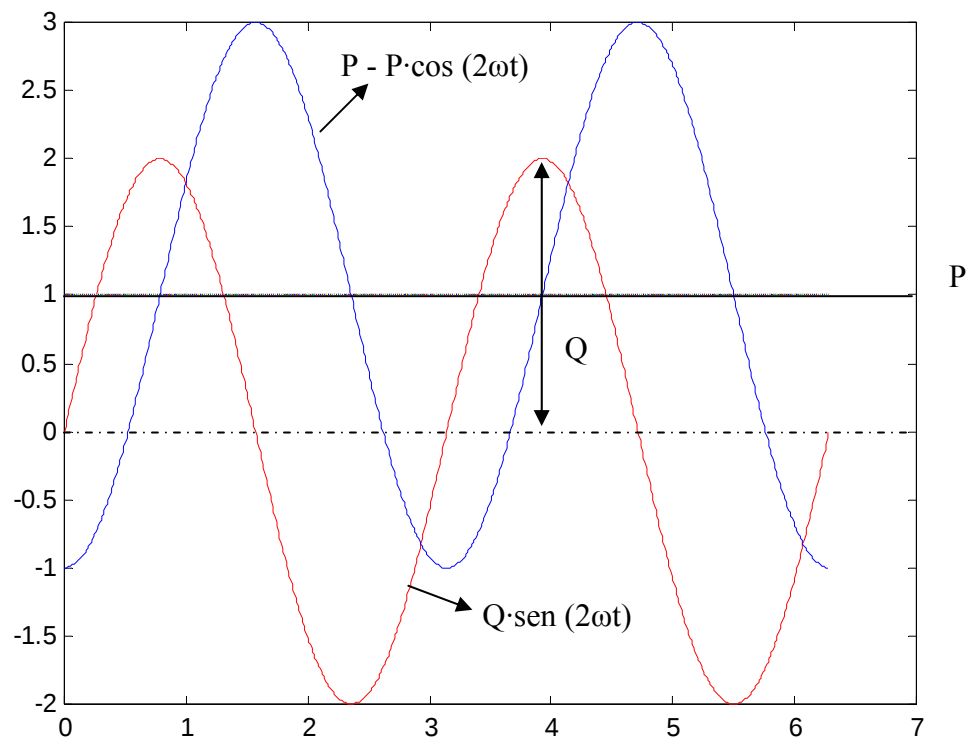


Fig. 1 Potencia instantánea

2.2.2 Potencia de dimensionamiento en sistemas con armónicos. La potencia de dimensionamiento (aparente) “S” en presencia de armónicos, tendrá un valor mayor que si en el sistema sólo existieran ondas de una única frecuencia, por lo tanto el dimensionamiento del sistema debe ser mayor dependiendo de la distorsión armónica total tanto de tensión como de corriente.

Para esta situación, el valor eficaz de la tensión y la corriente se obtiene a partir de las componentes armónicas como:

$$V = \sqrt{\sum_k V_k^2} \quad (14)$$

$$I = \sqrt{\sum_k I_k^2} \quad (15)$$

Donde V_k e I_k , corresponde a los valores eficaces de la tensión y la corriente, respectivamente, para cada una de las componentes armónicas.

El valor de S se obtiene reemplazando los valores de V e I de las ecuaciones 14 y 15 en la ecuación 3.

2.2.3 Potencia activa en sistemas con armónicos. Para ondas de tensión y corriente distorsionadas (con componentes armónicas), la potencia activa se define como la sumatoria de las potencias activas debidas a la tensión y corriente de cada una de los de las componentes armónicas:

$$P = \sum_{k=1}^N V_k \cdot I_k \cdot \cos(\theta_k) \quad (16)$$

Donde V_k e I_k corresponden a los valores eficaces de la tensión y la corriente respectivamente, y θ_k es el ángulo entre la tensión y la corriente de este armónico.

2.2.4 Potencia reactiva en sistemas con armónicos. El concepto de la potencia reactiva “ Q_k ” se puede definir para cada una de las componentes armónicas como:

$$Q_k = V_k \cdot I_k \cdot \sen \theta_k \quad (17)$$

Donde V_k , I_k y θ_k fueron definidos previamente.

Teniendo en cuenta que Q_k es la amplitud de una señal que oscila al doble de la frecuencia de las componentes armónicas de tensión y corriente de orden k , es incorrecto expresar la potencia reactiva del sistema como la suma de las potencias reactivas por armónico, expresión sugerida por Budeanu⁶.

Por otra parte el concepto de potencia reactiva para sistemas con armónicos, debe ser ampliado para tener en cuenta los efectos que sobre el sistema tiene las componentes armónicas.

2.2.5 Otras componentes de frecuencias en sistemas con armónicos. Además de las potencias activa y reactiva que se deben a la interacción de tensiones y corrientes de la misma frecuencia, aparecen otras potencias debidas a la interacción entre tensiones y corrientes de frecuencias diferentes, que Budeanu llamó potencia de distorsión, sin embargo la expresión propuesta por Budeanu no expresa del todo el significado físico de este efecto.

Otra componente de potencia que hay que evaluar en sistemas trifásicos es la debida al desbalance de cargas y/o al desequilibrio de las tensiones.

Estas componentes de potencia son oscilatorias con valor medio nulo, por lo cual no consumen ni generan potencia activa, pero si incrementan el dimensionamiento del sistema reduciendo la eficiencia del mismo, es decir disminuyen el factor de potencia.

⁶ PETIT SUAREZ, Johann Farit y USTARIZ FARFAN, Armando Jaime. Análisis general de armónicos: revisión de las definiciones de potencia. Bucaramanga, 1997. p. 28. Tesis de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas.

2.3 MODELO DE CZARNECKI DE POTENCIAS EN SISTEMAS TRIFÁSICOS CON COMPONENTES ARMÓNICAS

El modelo de Czarnecki está basado en la descomposición de la corriente instantánea en cinco componentes ortogonales entre si para circuitos trifásicos asimétricos de tres hilos en regímenes no senoidales. Con la importancia de que a cada una de estas componentes se le atribuye un efecto físico⁷⁻⁸⁻⁹⁻¹⁰.

En el modelo se considera la admitancia por armónico $Y_k = G_k + jB_k = \frac{\vec{I}_k}{\vec{V}_k}$; donde G_k es la conductancia para el k-ésimo armónico.

Las cinco componentes de corriente son:

- **Corriente activa.** Se define la corriente activa i_a como la componente de la corriente que esta en fase con la tensión de alimentación. El producto del valor eficaz de esta corriente por el valor eficaz de la tensión corresponde a la potencia activa del sistema P.

Para obtener la corriente activa se define una conductancia equivalente G_e que es igual a:

$$G_e = \frac{P}{V^2} \quad (18)$$

⁷ ORDÓÑEZ PLATA, Gabriel et al. Propuesta de factores de penalización en regímenes no senoidales. I CIEEE, marzo, 2000; 6 p. ISSN 958-9318-69-X.

⁸ PETIT SUAREZ, Johann Farito y USTARIZ FARFAN, Armando Jaime. Análisis general de armónicos: revisión de las definiciones de potencia. Bucaramanga, 1997. p. 37. Tesis de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas.

⁹ CONGRESO REGIONAL DEL ÁREA ANDINA IEEE-ANDESCON99. Factores de discriminación en regímenes no senoidales. Isla Margarita, 1999.

¹⁰ REVISTA MUNDO ELÉCTRICO COLOMBIANO. Armónicos: definiciones de la potencia en regímenes no senoidales. Vol. 14 No 40. Julio-septiembre, 2000. p. 165-167.

Donde V es el valor eficaz de la tensión y P la potencia activa total. Una vez obtenida G_e , la corriente activa se expresa como:

$$i_a(t) = G_e v(t) \quad (19)$$

- **Corriente residual.** La corriente residual $i_s(t)$ aparece en el modelo como consecuencia de la variación de la conductancia por armónico G_n con respecto a la conductancia equivalente (fija) G_e y se define como:

$$i_s(t) = (G_o - G_e)V_o + \sqrt{2}\Re\left\{\sum_k (G_k - G_e)\bar{V}_k e^{jk\omega_o t}\right\} \quad (20)$$

Donde: G_o : conductancia de la componente de continua

G_k : conductancia del armónico k-ésimo

V_o : valor de la tensión de continua

$\bar{V}_k$: fasor del valor eficaz de la tensión del armónico k-ésimo

$\Re$: parte real

- **Corriente de magnetización.** La corriente de magnetización (en algunos casos puede ser de polarización debida a campos eléctricos) $i_m(t)$ es la componente debida al flujo de potencia magnetizante de elementos reactivos de susceptancia B_k (en el armónico k-ésimo) y se define como:

$$i_m(t) = \sqrt{2}\Re\left\{\sum_k jB_k \bar{V}_k e^{jk\omega_o t}\right\} \quad (21)$$

- **Corriente generada.** La corriente generada $i_g(t)$ es la componente de corriente debida a la no linealidad de la carga y se define como:

$$i_g(t) = \sqrt{2}\Re\left\{\sum_{r \neq k} I_r e^{jr\omega_o t}\right\} \quad (22)$$

donde r son los armónicos que aparecen en la corriente y no están en la tensión.

- **Corriente de desbalance.** La corriente de desbalance $i_u(t)$ es la componente de corriente debida al desbalance de la carga trifásica conectada al sistema y se define como:

$$i_u(t) = \sqrt{2} \Re \left\{ \sum_k (A_k V_k) e^{jk\omega_o t} \right\} \quad (23)$$

Esta componente de corriente también se puede obtener evaluando las componentes de secuencia de la corriente por cada uno de los armónicos y corresponderá a la componente de secuencia contraria (positiva o negativa) al armónico que se este evaluando. Es decir, para la componente fundamental corresponderá a la componente de secuencia negativa, mientras que para el quinto armónico corresponderá a la componente de secuencia positiva.

El coeficiente complejo A_k (es llamado “admitancia de desbalance por armónico”) y se define como:

$$A_k = \left(\frac{\vec{I}_k}{\vec{V}_k} - Y_{ek} \right) \quad (24)$$

Una vez obtenida las cinco componentes de corriente, la corriente instantánea se puede expresar como:

$$i(t) = i_a(t) + i_s(t) + i_r(t) + i_u(t) + i_g(t) \quad (25)$$

Estas cinco componentes de corriente son ortogonales entre si¹¹; lo que implica que el valor eficaz de la corriente total se pueda hallar aplicando la norma 2. Es decir:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_s^2 + I_m^2 + I_u^2 + I_g^2} \quad (26)$$

¹¹ CZARNECKI, Leszek S. Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source. IEEE, Transactions on instrumentation and measurement, Vol. 37 No1, march, 1988.

El valor eficaz de cada una de estas componentes es:

$$I_a = G_e V \quad (27)$$

$$I_s = \sqrt{\sum_{k=0}^N [(G_k - G_e)]^2 V_k^2} \quad (28)$$

$$I_m = \sqrt{\sum_{k=1}^N (B_k V_k)^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{Q_k}{V_k} \right)^2} \quad (29)$$

$$I_g = \sqrt{\sum_{r=k} I_r^2} \quad (30)$$

$$I_u = \sqrt{\sum_{k=1}^N I_{u_k}^2} \quad (31)$$

En la figura 2 se muestra la contribución de cada componente de corriente al valor eficaz de la corriente total en un diagrama fasorial en un plano bidimensional.

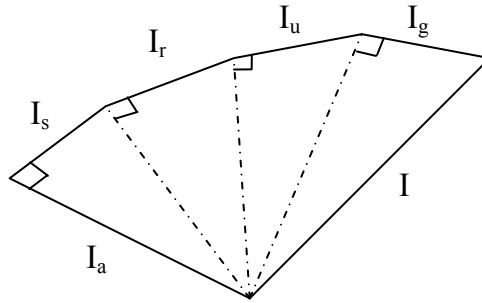


Fig. 2 Diagrama fasorial de corrientes

Para obtener las potencias del sistema se multiplica el valor eficaz de la tensión por cada uno de los valores eficaces de las componentes de corriente, es decir que la potencia de dimensionamiento del sistema es igual a:

$$S = V \cdot I = \sqrt{P^2 + Q_m^2 + D_s^2 + D_u^2 + D_g^2} \quad (32)$$

Siendo:

$P = VI_a$	Potencia activa
$Q_m = VI_m$	Potencia de magnetización
$D_s = VI_s$	Potencia residual
$D_u = VI_u$	Potencia de desbalance
$D_g = VI_g$	Potencia de armónicos generados

Para efectos de medición de potencia es adecuado asociar las potencias no activas en un solo término, que será el que se define para este caso como la potencia reactiva, es decir:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_r^2} \quad (33)$$

Siendo Q_r igual a:

$$Q_r = \sqrt{Q_m^2 + D_s^2 + D_u^2 + D_g^2} \quad (34)$$

Es decir que en este caso, la potencia reactiva tiene en cuenta todas las componentes de potencia que hacen que el dimensionamiento del sistema sea mayor. Esta potencia corresponde a la definida por Fryze¹², la cual es conocida como la potencia reactiva de Fryze o potencia ficticia según Czarnecki.

2.4 DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL

La existencia de las componentes armónicas hace que la forma de onda correspondiente (tensión y/o corriente) se distorsione. Un índice que se utiliza para

¹² Cox & Bayhzouz. A review of powers according to the IEEE Standard dictionary. IEEE, 1991.

cuantificar este efecto es la Distorsión Armónica Total (DAT) o Total Harmonic Distortion (THD).

Las expresiones para evaluar las distorsiones armónicas totales de tensión y corriente (en por unidad) son:

$$DAT_V = \frac{\sqrt{\sum_{k \neq 1} V_k^2}}{V_1} \quad (35)$$

$$DAT_I = \frac{\sqrt{\sum_{k \neq 1} I_k^2}}{I_1} \quad (36)$$

Este índice establece la relación entre la energía de la señal debida a las componentes armónicas con respecto a la energía de la componente fundamental de la señal. Por consiguiente teniendo en cuenta la definición de la potencia de dimensionamiento (ecuación 3) se obtiene que esta potencia se puede expresar como:

$$S = V_1 I_1 \sqrt{1 + (DAT_V)^2} \sqrt{1 + (DAT_I)^2} \quad (37)$$

Donde V_1 e I_1 son los valores eficaces de la tensión y la corriente de la componente fundamental.

En la ecuación 37 es evidente que la existencia de los armónicos hace que la potencia de dimensionamiento sea mayor, ya que los índices DAT_V y DAT_I se incrementaran en la medida que existan componentes armónicas.

3. EL MEDIDOR DIGITAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En la medición de energía eléctrica, la exactitud del equipo de medición es esencial debido a que los valores estimados por estos equipos, se ven traducidos en dinero. Por esta razón los medidores digitales y estáticos han venido desplazando a los electromecánicos, debido a que en estos últimos las mediciones pueden ser influenciadas por factores externos como: desgaste de piezas y descalibración, comportamientos no adecuados de los materiales debido a la temperatura, etc.; además el funcionamiento de los medidores de energía de inducción depende fundamentalmente de factores asociados al movimiento de piezas, lo que los hace muy poco funcionales frente a los digitales, los cuales basan su funcionamiento principalmente en algoritmos que son programados en dispositivos digitales. El tratamiento digital de señales debido a la naturaleza de las señales que se procesan (digitales) garantiza con una mayor probabilidad que éstas no se vean modificadas y de esta forma que los resultados obtenidos después del procesamiento, sean más cercanos a los valores reales.

El medidor de estado sólido o medidor digital provee una solución única para casi todas las aplicaciones de medición. Actualmente, en el mercado se tienen medidores digitales de todas las gamas, los cuales van desde los que son diseñados únicamente para registrar energía hasta los mas sofisticados equipos que cuentan con un amplio paquete de funciones.

En este capítulo se describen las características básicas de los equipos de medición digitales de energía eléctrica y los algoritmos utilizados por estos equipos para estimar las diferentes energías eléctricas.

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Un medidor digital de energía eléctrica, es un dispositivo que mediante el procesamiento de señales de tensión y corriente, obtiene los valores de potencia y energía eléctrica, además de otros parámetros que se describirán posteriormente. Este dispositivo, es utilizado principalmente para:

- Calcular consumos o suministros de energía eléctrica de un usuario o un área determinada.
- Observar el comportamiento de las cargas de los usuarios.
- Realizar la monitorización del flujo de energía eléctrica.

Según el tipo de sistema eléctrico en el cual se desee instalar el medidor digital, se clasifican en dos tipos:

- Monofásicos.
- Polifásicos.

A continuación se hará referencia a los medidores digitales trifásicos, debido a que los contadores instalados en las fronteras comerciales de la ESSA E.S.P son de este tipo.

3.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Un medidor digital básicamente esta conformado por tres etapas: adquisición de datos, procesamiento de señales y visualización. En la Fig. 3 se muestra el esquema de los bloques que constituyen un medidor digital.

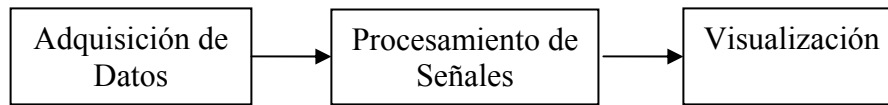


Fig. 3 Bloques básicos de un medidor digital de energía eléctrica

En un medidor digital, las señales analógicas de tensión y corriente son adquiridas y digitalizadas tomando muestras y convirtiendo estas muestras en un registro. Una vez digitalizadas, los valores de las muestras son utilizados para estimar los parámetros requeridos para evaluar las potencias y energías del sistema. Estas métricas son almacenadas en memoria y están disponibles para su utilización; este proceso corresponde a la etapa de procesamiento de señales. Las estimaciones realizadas pueden ser visualizadas en una pantalla de cristal líquido (LCD) o leídas de la memoria del equipo por medio de un puerto de comunicación, lo que permite que estos resultados puedan ser visualizados en la pantalla de un computador.

El procesamiento de las señales depende de los algoritmos que se implementen para estimar los parámetros de las señales y del sistema (valores eficaces, potencias, energías, distorsiones armónicas, etc.).

3.3 COMPONENTES DEL MEDIDOR DIGITAL

A continuación se describen los tres bloques básicos que conforman un medidor digital de energía.

3.3.1 Etapa de adquisición de datos. Esta etapa tiene los sensores que realizan la monitorización tanto de la corriente como de la tensión de las tres fases del sistema trifásico y esta conformada por:

- Los divisores de tensión se encargan de establecer una tensión proporcional a la tensión del sistema (de menor valor) para que esta sea adquirida y digitalizada por el convertidor A/D.
- Los sensores de corriente, los cuales establecen una tensión proporcional a la corriente que circula por el conductor que esta siendo sensado y que luego es adquirida y digitalizada por el convertidor A/D.

3.3.2 Etapa de procesamiento de señales. La etapa de procesamiento de señales se muestra en la Fig. 4 y esta conformada por tres bloques, cada uno de ellos con las siguientes funciones:

- El circuito integrado que realiza el proceso de la medición de energía eléctrica y que consta de los convertidores A/D y del procesador digital de señales (DSP), donde se programan los algoritmos de estimación de potencia y energía.
- El microcontrolador que se encarga de almacenar la información procesada por el DSP en la memoria y de controlar el visualizador (LCD) que muestra las estimaciones realizadas.
- La memoria EEPROM donde se almacena la inicialización del proceso, las constantes de calibración, la información de facturación (energía, demanda máxima, demanda acumulada) y demás funciones adicionales.

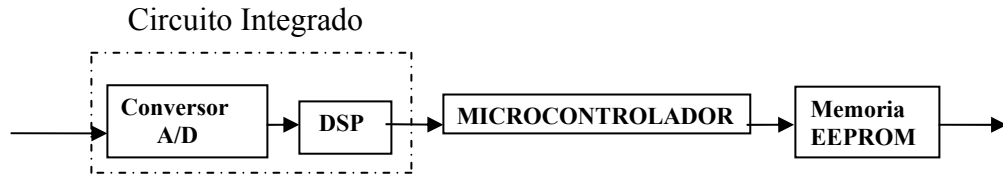


Fig. 4 Etapa de procesamiento de señales

3.3.3 Etapa de visualización. En la etapa de visualización el medidor digital ofrece tres maneras para visualizar tanto resultados de mediciones como la parametrización del mismo.

- Una pantalla de cristal líquido que permite la personalización de la información que requiere el usuario y la visualización de datos de facturación, así como información estadística.
- Un puerto óptico que consiste de un diodo emisor (transmisor) y un fototransmisor (receptor) que permite la comunicación serial con el microcontrolador.
- Una interfase del módulo principal que permite la conexión de un módem externo, el cual se comunica por puerto serial con el microcontrolador y a través de telemedida o con un PC local permite la visualización de datos de facturación, así como la información estadística y de parametrización del medidor por medio de un “software” especializado para cada marca.

3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MEDIDOR DIGITAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Uno de los principales objetivos de los medidores digitales consiste en aplicar la tecnología de punta en la medición de los diversos parámetros eléctricos. Sin embargo, en la actualidad son muy pocos los usuarios que realmente aprovechan la

información suministrada por estos equipos y simplemente se limitan a verlos como un sencillo registrador de energía para efectos de facturación, desaprovechando las opciones y alternativas que podrían emplear en la planeación de procesos productivos y estrategias de uso racional de energía (URE)¹³.

A continuación se enuncian las características más importantes del medidor digital de energía eléctrica.

3.4.1 Ventajas de los medidores digitales. Entre las ventajas que se tienen con los medidores digitales están:

- Alta exactitud y precisión en la medida.
- La calibración se realiza mediante “software”.
- El mayor control sobre el consumo de energía al disponer de mayor información tanto para el consumidor como para la empresa prestadora del servicio.
- Le permite a las empresas el uso de esquemas tarifarios.
- Disminuye la posibilidad de fraude.
- Se pueden establecer planes de automatización de la lectura.
- Se logra disminuir el error humano en la realización de lectura de la medida.
- Se puede realizar la medición de energía activa, reactiva y de dimensionamiento con un mismo equipo.

3.4.2 Desventajas de los medidores digitales. Algunas de las desventajas de estos equipos son las siguientes:

¹³ <<http://www.conenergia.com>>

- El alto costo inicial de inversión, el cual ha disminuido a medida que se ha ido masificando su utilización y que en algunos sistemas no es significativo cuando se estiman los beneficios que provee.
- Los mayores cuidados que se deben tener en su instalación: uso de protecciones contra descargas atmosféricas, sobre corrientes y sobre tensiones.

3.5 MARCAS DE MEDIDORES DIGITALES DE ENERGÍA ELÉCTRICA COMÚNMENTE INSTALADAS EN COLOMBIA

En el mercado colombiano las marcas de medidores digitales de energía eléctrica instalados son EMH-ELGAMA, ABB y SCHLUMBERGER. Todas estas marcas cuentan con sus respectivos programas de lecturas para indagación remota. La principal característica de estos equipos es su fácil instalación, manejo y bajo costo.

Existen diferencias en la presentación de datos y variables registradas de acuerdo a la marca del medidor pero en general estos equipos registran:

- Tensiones y corrientes de fase.
- Factor de potencia.
- Energía activa, reactiva y de dimensionamiento (aparente).
- Cortes de servicio.
- Distorsión armónica.

3.6 ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN

Los equipos de medición digital son programados para estimar las magnitudes de energía eléctrica de un sistema a partir de las muestras digitalizadas de tensión y corriente. Los procedimientos que se programan en estos dispositivos se conocen como algoritmos y se puede definir un algoritmo como el conjunto finito de

instrucciones o pasos que sirven para ejecutar una tarea o resolver un problema. En el caso de la medición de energía eléctrica, el algoritmo de medición son los pasos mediante los cuales se obtienen los resultados de las potencias: activa, reactiva y de dimensionamiento (aparente), a partir de las muestras de las señales de tensión y corriente.

A continuación se describirán los algoritmos utilizados para la estimación de potencia de los medidores digitales analizados en este trabajo.

3.6.1 Medidor ABB ref. ALPHA II. En este medidor, las potencias de dimensionamiento y activa se obtienen a partir de las muestras de las señales de tensión y corriente, mientras que la potencia reactiva se evalúa con base en las estimaciones de las dos potencias anteriores.

Constantes como el periodo de la señal, son almacenadas en memoria, para su posterior utilización en la evaluación de las potencias que requieran de estos valores.

La velocidad de muestreo de los convertidores A/D de este equipo es de 2,4 KHz. y el número de bits del convertidor es de 21 bits¹⁴. Esta frecuencia de muestreo permite que se puedan estimar componentes armónicas hasta el orden 19.

3.6.1.1 Estimación de la potencia activa. La potencia activa se obtiene integrando en un periodo la potencia instantánea y dividiendo en el periodo este resultado¹⁵ (ecuación 5).

¹⁴ ABB METERING (USA). ALPHA METER: Medidor electrónico y analizador de servicio Alpha II. Santa Fe de Bogotá: ABB-COLTAVIRA, 1994. 47 P.

¹⁵ ENTE NACIONAL REGULADOR DE LA ELCTRICIDAD (COLOMBIA). Expediente 2659 del ENRE - Reclamo del cliente Acalú – Cta 20 1-0841-84. Santa Fe de Bogota: Edenor, noviembre, 1996. 7 p.

El medidor digital evalúa esta potencia a partir de las muestras de tensión y corriente como:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_n i_n \quad (38)$$

Siendo N el número de muestras de tensión y corriente adquiridas en un periodo, y v_n e i_n las muestras de tensión corriente en el instante n.

3.6.1.2 Estimación de la potencia de dimensionamiento (aparente). La potencia de dimensionamiento es estimada como el producto entre el valor eficaz de la tensión y el valor eficaz de la corriente. Los valores eficaces de tensión y corriente se obtienen con las muestras de tensión y corriente. La ecuación evaluada por el medidor digital es:

$$S = V \cdot I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_n^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_n^2} \quad (39)$$

Siendo N el número de muestras de tensión y corriente en un periodo, y v_n e i_n las muestras de tensión y corriente en el instante n.

3.6.1.3 Estimación de la potencia reactiva. La magnitud de la potencia reactiva por fase, es estimada a partir de las potencias activa y de dimensionamiento, por medio de la expresión:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (40)$$

3.6.1.4 Estimación del factor de potencia. El factor de potencia es obtenido como la relación entre la potencia activa y la potencia de dimensionamiento (ecuación 7).

3.6.1.5 Estimación de potencias trifásicas. Las potencias trifásicas activa, reactiva y de dimensionamiento, se obtienen sumando aritméticamente las potencias de cada fase:

$$P_{3\phi} = P_R + P_S + P_T \quad (41)$$

$$S_{3\phi} = S_R + S_S + S_T \quad (42)$$

$$Q_{3\phi} = Q_R + Q_S + Q_T \quad (43)$$

3.6.2 Medidor SIEMENS ref. S4. En este medidor, las potencias de dimensionamiento, activa y reactiva se determinan a través de la medición de las tensiones y corrientes instantáneas.

Constantes como el periodo de las señales, son guardadas en la memoria EEPROM, para su posterior utilización en la evaluación de las potencias que requieran estos valores.

Las señales de tensión y corriente, son adquiridas por los convertidores a una velocidad de 3,33 MHz. Estas muestras son filtradas digitalmente para proveer un registro de 20 bits, a una frecuencia de muestreo de 3,34 kHz. Esto hace posible discernir hasta la frecuencia del armónico 23avo¹⁶.

3.6.2.1 Estimación de la potencia activa. La potencia activa se obtiene integrando en un periodo la potencia instantánea y dividiendo en el periodo este resultado (ecuación 5). Este medidor evalúa esta potencia con la expresión dada en la ecuación 38.

¹⁶ SIEMENS (USA). Medidor de estado sólido S4. Boletín 987, revisión 2. Charlotte: SIEMENS, 1997. 85 p.

3.6.2.2 Estimación de la potencia reactiva. La potencia reactiva se estima integrando inicialmente la señal de tensión para obtener un cambio de fase de 90° en esta señal y posteriormente multiplicarla por la corriente para luego realizar la integral de este producto de señal y obtener el valor medio. Es decir, evaluando las siguientes expresiones:

$$v_Q = \int v(t)dt \quad (44)$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_T v_Q(t) \cdot i(t)dt \quad (45)$$

El medidor digital evalúa esta potencia a partir de las muestras de tensión y corriente como:

$$V_Q = \sum_{n=0}^{N-1} v_n \quad (46)$$

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V_{Q_n} \cdot i_n = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V_{Q_n} \cdot i_n \quad (47)$$

Siendo N el número de muestras de tensión y corriente en un periodo, y V_{Q_n} e i_n las muestras de la integral de la tensión y de la corriente, respectivamente en el instante n.

3.6.2.3 Estimación de la potencia de dimensionamiento. La potencia de dimensionamiento se evalúa como el producto del valor eficaz de la tensión por el valor eficaz de la corriente (ecuación 39).

3.6.2.4 Estimación del factor de potencia. El factor de potencia es obtenido como la relación entre la potencia activa y la potencia de dimensionamiento (ecuación 7).

3.6.2.5 Estimación de potencias trifásicas. Las potencias trifásicas activa, reactiva y de dimensionamiento, se obtienen a partir de las ecuaciones 41, 42 y 43.

3.6.3 Medidor EMH-ELGAMA ref. LZQM. En este medidor, las potencias aparente, activa y reactiva se determinan a través de la medición de las tensiones y corrientes instantáneas.

Las señales de tensión y corriente, son obtenidas por los convertidores A/D a una velocidad de 19,2 kHz¹⁷.

3.6.3.1 Estimación de la potencia activa. Este medidor digital evalúa esta potencia utilizando la ecuación 38.

3.6.3.2 Estimación de la potencia reactiva. El medidor digital estima esta potencia como el valor medio de la integral del producto de la señal de tensión atrasado $\frac{\pi}{2\omega}$ con la señal de corriente. Es decir:

$$Q = \frac{1}{T} \int v \left(t - \frac{\pi}{2\omega} \right) \cdot i(t) dt \quad (48)$$

Teniendo en cuenta esta expresión, este medidor evalúa la potencia reactiva como:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_n^{(90)} \cdot i_n dt \quad (49)$$

Donde N es el número de muestras en un periodo y $v_n^{(90)}$ e i_n son las muestras de las señales de tensión (atrasada $\frac{\pi}{2\omega}$) y de corriente, respectivamente, en el instante n.

¹⁷ < e-mail: información@instra.com.lt >

3.6.3.3 Estimación de la potencia de dimensionamiento. La potencia de dimensionamiento se estima como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la potencia activa y reactiva (ecuación 4).

3.6.3.4 Estimación del factor de potencia. El factor de potencia es estimado como el coseno del arco tangente de la relación entre las potencias trifásicas reactiva y activa, y esta definido por la expresión:

$$\text{F.P.} = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right) \quad (50)$$

3.6.3.5 Estimación de potencias trifásicas. Las potencias trifásicas activa, reactiva y de dimensionamiento, se obtienen utilizando las ecuaciones 41, 42 y 43.

3.6.4 Medidor SCHLUMBERGER ref. QUANTUM, FULCRUM y VECTRON. En estos medidores, las potencias de dimensionamiento, activa y reactiva se obtienen a partir de muestras de tensión y de corriente.

Las señales de tensión y corriente, son obtenidas por los convertidores a una velocidad de 29,4 kHz para la ref. VECTRON y a 44 kHz para las ref. FULCRUM y QUANTUM¹⁸.

3.6.4.1 Estimación de la potencia activa. Este medidor estima esta potencia con la expresión dada por la ecuación 38.

3.6.4.2 Estimación de la potencia reactiva. Este medidor estima esta potencia con la expresión dada por la ecuación 49.

¹⁸ < e-mail: Nickson@oconee.sema.slb.com >

3.6.4.3 Estimación de la potencia de dimensionamiento. Esta potencia se estima como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la potencia activa y reactiva (ecuación 4).

3.6.4.4 Estimación del factor de potencia. El factor de potencia es obtenido como la relación entre la potencia activa y la potencia de dimensionamiento (ecuación 7).

3.6.4.5 Estimación de potencias trifásicas. Las potencias trifásicas activa, reactiva y de dimensionamiento, se obtienen a partir de las ecuaciones 41, 42 y 43.

3.7 ANÁLISIS DE LOS ALGORITMOS

3.7.1 Algoritmos de estimación de la potencia activa. La expresión matemática utilizada por todos los medidores digitales para estimar la potencia activa es la mostrada en la ecuación 38.

La estimación de esta potencia mediante esta ecuación corresponde a la energía activa consumida por el usuario siempre y cuando las señales de tensión y corriente presenten componentes de frecuencia del ancho de banda estipulado por el medidor.

Un aspecto a tener en cuenta es el ancho de banda de los transformadores de tensión y corriente utilizados para disminuir los niveles de tensión y corriente, los cuales pueden disminuir el ancho de banda efectivo del medidor.

Los medidores digitales utilizados por la ESSA E.S.P estiman la potencia activa de forma adecuada, ya que el algoritmo utilizado para este fin permite obtener el valor promedio de la potencia instantánea. El ancho de banda de los instrumentos de medición permite tener en cuenta en la evaluación componentes armónicas hasta de orden 25. Este ancho de banda puede verse restringido por las características de

respuesta en frecuencia de los PTs y CTs utilizados para disminuir los niveles de tensión y corriente.

La conexión Aron utilizada en varias de las fronteras de la ESSA E.S.P no afecta la estimación de la potencia activa, es decir que si los sistemas de adecuación de las señales de tensión y corriente (PTs y CTs) cumplen con los registros de clase y ancho de banda, la estimación de la energía activa dada por los medidores digitales es adecuada y los errores en la misma corresponden a los especificados por los fabricantes de estos equipos.

3.7.2 Algoritmos de estimación de la potencia reactiva. La estimación de esta potencia se realiza de tres formas diferentes en los medidores analizados y el error que se presente dependerá de las características de: las señales de tensión y corriente, el sistema sometido a medición y el tipo de conexión realizada.

- **Medidor ABB ref. ALPHA II.** Este medidor estima la potencia reactiva de acuerdo con la expresión matemática dada en la ecuación 40 lo cual garantiza que se está estimando toda la energía no activa demanda por una carga sin importar sus características, por consiguiente los errores que se presentan en la estimación corresponden a los especificados por los fabricantes de este equipo. Sin embargo, al igual que con la estimación de la potencia activa, es necesario garantizar que los PTs y los CTS utilizados cumplan con las especificaciones mínimas de clase y ancho de banda.
- **Medidores SIEMENS ref. S4.** El algoritmo de medición de potencia reactiva utilizado por este medidor pretende evaluar:

$$\sum_{k=1}^{N-1} V_k \cdot I_k \cdot \text{sen}(\theta_k)$$

Al integrar inicialmente la tensión, se garantiza que las señales de tensión de todas las frecuencias se atrasan 90° , evitando el error cometido por los medidores que directamente atrasa la señal de tensión 90° . Sin embargo, al integrar la tensión, este resultado debe producirse por una constante que depende de la frecuencia de la señal, por consiguiente las magnitudes de las componentes de frecuencias distintas a la fundamental se verían disminuidas por un factor igual al orden del armónico. Al igual que con las mediciones de las marcas EMH-ELGAMA y SCHLUMBERGER, la otra falencia de este algoritmo de estimación es que no tiene en cuenta el efecto que en la potencia de dimensionamiento del sistema tienen las componentes armónicas de la tensión y la corriente, motivo por el cual puede subregistrar el valor de la potencia reactiva necesaria para que el sistema funcione adecuadamente.

- **EMH-ELGAMA ref. LZQM y SCHLUMBERGER ref. QUANTUM, FULCRUM y VECTRON.** El algoritmo de estimación de energía reactiva utilizado por estos medidores digitales es similar al utilizado en medidores de reactiva de inducción; el cual considera que las señales de tensión y corriente tienen una única componente de frecuencia (60 Hz). Por consiguiente, los errores de estimación serán mayores a los especificados por los fabricantes cuando las señales de tensión y corriente presenten componentes armónicas.

El algoritmo utilizado para esta estimación de potencia reactiva (ecuación 49) utiliza el principio de los medidores analógicos donde la señal de tensión se retrasa 90° de la señal de corriente y se evalúa la potencia reactiva como si se estuviera evaluando la potencia activa (valor medio del producto de tensión por corriente). La falencia de esta estimación está en que los 90° de retraso son con respecto a la frecuencia de 60 Hz, pero estos

90° hay que multiplicarlos por el orden del armónico para las demás componentes armónicas de las señales de tensión y corriente y es así que por ejemplo para el tercer armónico los 90° del retraso se convierten en 270°, es decir en realidad se está adelantando esta componente 90°.

Además, el algoritmo intenta evaluar la potencia reactiva mediante la ecuación:

$$Q = \sum_{k=1}^M V_k I_k \sin \varphi_k \quad (51)$$

Siendo V_k e I_k los valores eficaces de las componentes del armónico k -ésimo y φ_k el ángulo existente entre la tensión y la corriente de este armónico. Esta expresión no es adecuada dada la característica de la potencia reactiva por armónico que corresponde al valor máximo de una oscilación de frecuencia. Estas oscilaciones de frecuencia son realizadas a frecuencias diferentes por cada componente armónica, motivo por el cual no se deben sumar como lo establece la ecuación 47.

Otra falencia de este algoritmo de estimación es que no tiene en cuenta los efectos que sobre el dimensionamiento del sistema tienen la aparición de componentes armónicas de tensión y corriente. Es decir que cuando se presentan componentes armónicas aparecen otras potencias que no realizan trabajo útil, pero que incrementan la magnitud de las señales de tensión y corriente, en general la utilización de este algoritmo puede hacer que se subregistre el consumo de la energía reactiva, teniendo en cuenta que la energía reactiva es toda aquella que requiere el sistema para funcionar y que no es activa.

3.7.3 Algoritmo de estimación de la potencia de dimensionamiento. La estimación de esta potencia la realizan los medidores de dos formas diferentes; unos

medidores utilizan como algoritmo de estimación el producto de los valores eficaces de tensión y corriente (ecuación 39) mientras que otros la evalúan como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las potencias activa y reactiva (ecuación 4).

- **Medidores ABB ref. ALPHA II y SIEMENS ref. S4.** Estos medidores estiman la potencia de dimensionamiento como el producto entre los valores eficaces de tensión y corriente, estimación adecuada sin importar las características del sistema sometido a medición y la forma de onda de las señales de tensión y corriente siempre y cuando los PTs y los CTs cumplan con las especificaciones de ancho de banda y clase.
- **Medidores EMH-ELGAMA ref. LZQM y SCHLUMBERGER ref. QUANTUM, FULCRUM y VECTRON.** El algoritmo de estimación de la potencia de dimensionamiento utilizado por estos medidores digitales tiene como uno de sus parámetros la potencia reactiva, la cual no es estimada adecuadamente, por lo consiguiente esta estimación tendrá errores superiores a los especificados por la clase del equipo.

La estimación de las potencias trifásicas como la suma de las potencias por cada una de las fases puede no ser lo mas adecuado en especial en la estimación de la potencia de dimensionamiento del sistema, sin embargo por ahora esta estimación es la que se considera más adecuada.

3.8 ÍNDICES DE CALIDAD DE ONDA

A partir del monitoreo que el medidor digital de energía eléctrica realiza al sistema eléctrico, se podría pensar en caracterizar el sistema para llegar a una posible evaluación de índices de calidad de ondas de tensión y corriente. Los medidores instalados por la ESSA E.S.P no permiten monitorear el sistema eléctrico en tiempo

real, es decir que no es posible a través de éstos tomar muestras de tensión y corriente que permitan evaluar índices de calidad de onda.

De los medidores digitales de las marcas analizadas, tan solo el medidor ABB ref. Alpha II permite obtener información acerca de los índices de distorsión armónica total de corriente y tensión. La información que brinda el medidor puede ser utilizada para alertar sobre condiciones de peligro para el sistema eléctrico. Es decir, el equipo de medida sólo reconoce el evento más no el dato del de la distorsión armónica ($DAT_V - DAT_I$) en un tiempo programado por el usuario¹⁹.

¹⁹ ABB METERING (USA). ALPHA METER: Medidor electrónico y analizador de servicio Alpha II. Santa Fe de Bogotá: ABB-COLTAVIRA, 1994. 47 P.

4. SIMULACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE POTENCIA DE LOS MEDIDORES DIGITALES

Con la aparición de los computadores y los avances tecnológicos, los trabajos o tareas realizadas por el ser humano se han visto influenciadas de una manera positiva. Tareas que podrían resultar casi imposibles de realizar por el ser humano, ahora son posibles de llevar a cabo con la ayuda de un computador. Es así como un computador permite optimizar labores, reducir tiempos de tareas y en la mayoría de los casos hacer más confiables los resultados arrojados al final de una labor realizada.

La evolución del computador como dispositivo físico no sería de gran ayuda sin los avances en las aplicaciones que se han desarrollado (“software”). Los programas desarrollados son los que interactúan con el usuario o realizan las tareas, siendo el “hardware” el medio físico que permite ejecutar sus procesos. Una de las grandes prestaciones de los programas es que permiten la simulación de diferentes procesos físicos. La simulación hoy en día juega un papel importante en cualquier proceso, ya que mediante ella se pueden prever eventos, observar comportamientos o crear un bosquejo de cómo se comportarán ciertos elementos dentro de un proceso. La validez de los resultados obtenidos en una simulación depende de los modelos que se implementen en la simulación, cuanto mas se aproximen los modelos a los reales, mas válidos serán los resultados de la simulación.

Teniendo en cuenta estas características se estableció una plataforma de simulación para evaluar el comportamiento de los medidores digitales de energía eléctrica.

La simulación propuesta modela los diferentes algoritmos utilizados en la estimación de potencias en los medidores digitales teniendo en cuenta las características de las señales de tensión y corriente. La plataforma sobre la cual se implemento la simulación es MATLAB.

En este capítulo se describirán y analizarán los aspectos mas importantes que fueron tenidos en cuenta para realizar la simulación de los medidores digitales de energía eléctrica.

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA

Este programa fue diseñado para simular las medidas digitales de energía realizadas por los medidores de las marcas ABB ref. Alpha II, SIEMENS ref. S4, EMH-ELGAMA ref. LZQM y SCHLUMBERGER ref. QUANTUM, FULCRUM y VECTRON.

El programa se encuentra dividido en tres grandes bloques:

- Entrada de datos.
- Procesamiento de datos.
- Resultados.

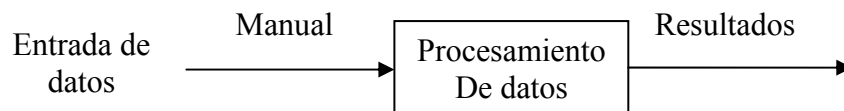


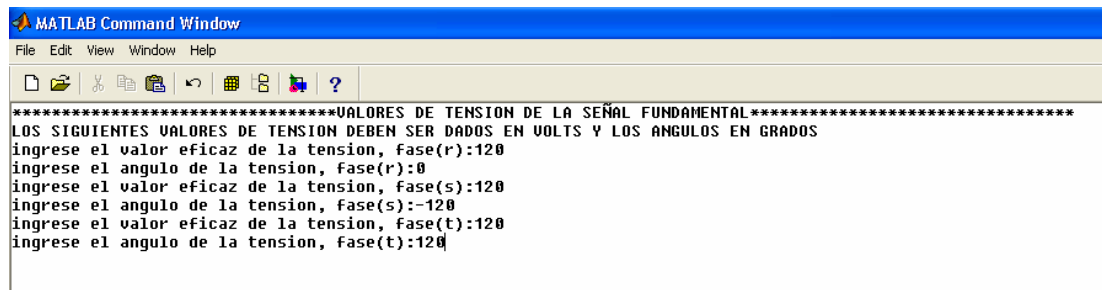
Fig. 5 Estructura del programa

4.1.1 Entrada de datos. Para iniciar la simulación es necesario guardar el archivo del programa de simulación en la carpeta “**work**” contenida en la carpeta de instalación de MATLAB. Desde el “**Work Space**” se digita la palabra “medidores”.

En esta etapa se ingresan los datos correspondiente a tensión y corriente por fase. El ingreso de datos al programa se realiza de manera manual por el usuario. El usuario

ingresa mediante el workspace de MATLAB (posterior a la ejecución del programa) los datos correspondientes a tensión y corriente que desea analizar. Los valores de la señal de tensión, serán ingresados en primera instancia, seguido por los valores de la señal de corriente. Los valores correspondientes a la frecuencia fundamental serán ingresados en un principio. Posteriormente se ingresaran las magnitudes (en porcentaje) y ángulos (grados) de los armónicos múltiplos enteros de la fundamental (tomando como base los valores eficaces de las señales de frecuencia fundamental).

El programa indicará paso a paso que datos debe ingresar el usuario. A continuación en las figuras 6 a 13 se muestran los datos de entrada requeridos por el programa con un ejemplo. La señal a ingresar es la correspondiente a la tabla 4, ...en la sección 5.1...

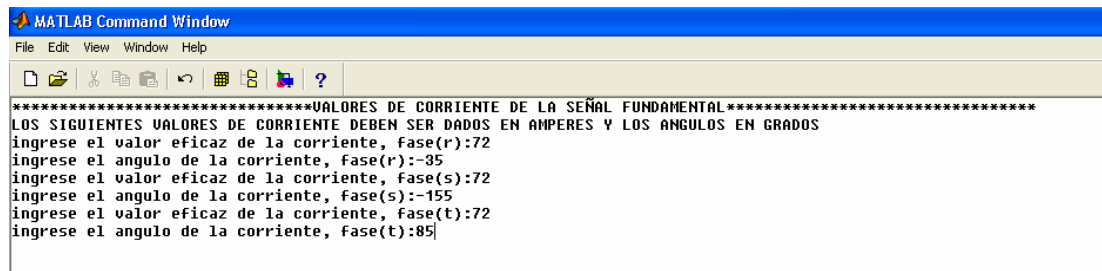


```

MATLAB Command Window
File Edit View Window Help

*****VALORES DE TENSION DE LA SEÑAL FUNDAMENTAL*****
LOS SIGUIENTES VALORES DE TENSION DEBEN SER DADOS EN VOLTS Y LOS ANGULOS EN GRADOS
ingrese el valor eficaz de la tension, fase(r):120
ingrese el angulo de la tension, fase(r):0
ingrese el valor eficaz de la tension, fase(s):120
ingrese el angulo de la tension, fase(s):-120
ingrese el valor eficaz de la tension, fase(t):120
ingrese el angulo de la tension, fase(t):120
  
```

Fig. 6 Ingreso del valor de tensión rms de la señal correspondiente a la frecuencia fundamental.



```

MATLAB Command Window
File Edit View Window Help

*****VALORES DE CORRIENTE DE LA SEÑAL FUNDAMENTAL*****
LOS SIGUIENTES VALORES DE CORRIENTE DEBEN SER DADOS EN AMPERES Y LOS ANGULOS EN GRADOS
ingrese el valor eficaz de la corriente, fase(r):72
ingrese el angulo de la corriente, fase(r):-35
ingrese el valor eficaz de la corriente, fase(s):72
ingrese el angulo de la corriente, fase(s):-155
ingrese el valor eficaz de la corriente, fase(t):72
ingrese el angulo de la corriente, fase(t):85
  
```

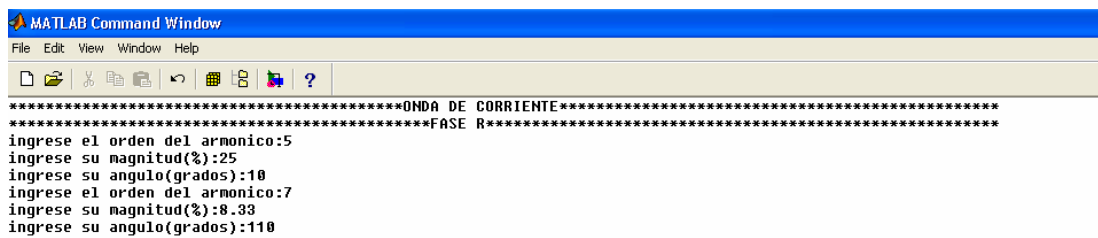
Fig. 7 Ingreso del valor de corriente rms de la señal correspondiente a la frecuencia fundamental.





```
*****ONDA DE CORRIENTE*****
*****FASE R*****
ingrese el orden del mayor armonico:7
```

Fig. 12 Ingreso del orden de la mayor componente armónica de corriente por fase.



```
*****ONDA DE CORRIENTE*****
*****FASE R*****
ingrese el orden del armonico:5
ingrese su magnitud(%):25
ingrese su angulo(grados):10
ingrese el orden del armonico:7
ingrese su magnitud(%):8.33
ingrese su angulo(grados):110
```

Fig. 13 Ingreso del orden de la componente armónica de corriente, su magnitud y ángulo por fase.

Para el funcionamiento apropiado del programa, en el ingreso de datos se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Este programa fue diseñado únicamente para el análisis de señales con armónicos enteros múltiplos de la frecuencia fundamental. Si se ingresan valores correspondientes a subarmónicos, éste presentará un error.
- Los valores de tensión y corriente correspondientes a la frecuencia fundamental, deben ser ingresados solo una vez, al iniciar la adquisición de los datos. Cuando se soliciten las magnitudes y ángulos por armónico, solo se deben ingresar los valores correspondientes a los armónicos múltiplos de la fundamental. En este punto no es necesario ingresar nuevamente los valores correspondientes a la frecuencia fundamental. Si por error estos valores son ingresados nuevamente, el programa no los tendrá en cuenta.

- Cuando el programa pregunte por el orden del mayor armónico, el usuario deberá ingresar únicamente el orden de este Ej.: si una señal tiene los armónicos 3, 6 y 9 el valor a ingresar en este punto es “9”. Este dato es requerido para realizar un proceso chequeo interno del programa. Este valor no hace parte de los datos a que se analizan en el procesamiento. Los valores de magnitud y ángulo correspondientes a este armónico, deberán ser ingresados posteriormente.
- Los valores de magnitud y ángulo por armónico, deben ser ingresados de una manera ordenada empezando por el armónico de menor orden y terminando con el de mayor orden.
- Si una señal, ya sea de tensión o de corriente no tiene armónicos, se debe ingresar “1”, cuando se pregunte por el orden del mayor armónico. Esto indica que la señal solo tienen una componente de frecuencia fundamental.

4.1.2 Procesamiento de datos. En este punto, los datos son sometidos a procesos matemáticos. Estos procesos corresponden a los algoritmos de medición de los medidores digitales estudiados. El tipo de proceso que se aplicará a los datos, será seleccionado por el usuario mediante un menú. Estos procesos están predeterminados, y solo se podrá optar por alguno de ellos. Para ello se le han asignado unos números de 1 – 5 a cada uno de las marcas de medidores analizados en este proyecto (ver figura 14).

```

MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
*****ALGORITMOS DE MEDICION*****
Elija el medidor que desee, tecleando el numero correspondiente a la marca y referencia deseada.
1. ABB ref. Alpha II
2. SIEMENS ref. S4
3. EMH-ELGAMA ref. LZQM
4. SCHLUMBERGER ref. FULCRUM, QUANTUM y VECTRON
5. Todos los medidores.
Estos valores estan dado en kW, KUARS y kVA, respectivamente
Ingrese el numero correspondiente al contador que se desea analizar:5

```

Fig. 14 Ingrese el número correspondiente al medidor que desea simular.

4.1.3 Resultados. El programa inicialmente presenta las características de las señales de tensión y corriente utilizados como entrada a cada una de las mediciones. Las figuras 14 a 17 muestran los resultados presentados inicialmente por el programa, el programa muestra los resultados de las potencias trifásicas (ver figura 18) estimados por los algoritmos de cada una de la medidas. Las magnitudes de potencia activa, reactiva y de dimensionamiento son estimadas en kW, kVAr y kVA respectivamente.

```

MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
-----SEÑALES DE TENSION EN EL TIEMPO-----
ur =
120*2^(1/2)*sin(120*pi*t)-12*2^(1/2)*sin(600*pi*t+5/18*pi)+6*2^(1/2)*cos(840*pi*t+1/6*pi)
us =
-120*2^(1/2)*sin(120*pi*t+1/3*pi)-12*2^(1/2)*cos(600*pi*t+4/9*pi)+6*2^(1/2)*sin(840*pi*t)
ut =
120*2^(1/2)*cos(120*pi*t+1/6*pi)+12*2^(1/2)*cos(600*pi*t+1/9*pi)-6*2^(1/2)*sin(840*pi*t+1/3*pi)
-----DISTORCION ARMONICA TOTAL DE TENSION-----
*****FASE R*****
DAT =
0.1118
*****FASE S*****
DAT =
0.1118
*****FASE T*****
DAT =
0.1118

```

Fig. 15 Ecuaciones de las señales de tensión de entrada con sus correspondientes índices de distorsión armónica total por fase.

```

MATLAB Command Window
File Edit View Window Help

-----SEÑALES DE CORRIENTE EN EL TIEMPO-----

ir =
    0.1119

is =
-72*2^(1/2)*cos(120*pi*t+11/36*pi)+18*2^(1/2)*sin(600*pi*t+1/18*pi)+1193719509723143/140737488355328*cos(840*pi*t+1/9*pi)

it =
72*2^(1/2)*sin(120*pi*t+17/36*pi)+18*2^(1/2)*sin(600*pi*t+7/18*pi)+1193719509723143/140737488355328*sin(840*pi*t+5/9*pi)

-----DISTORSION ARMONICA TOTAL DE CORRIENTE-----
*****FASE R*****

DAT =
    0.2635

*****FASE S*****

DAT =
    0.2635

*****FASE T*****

DAT =
    0.2635

```

Fig. 16 Ecuaciones de las señales de corriente de entrada con sus correspondientes índices de distorsión armónica total por fase.

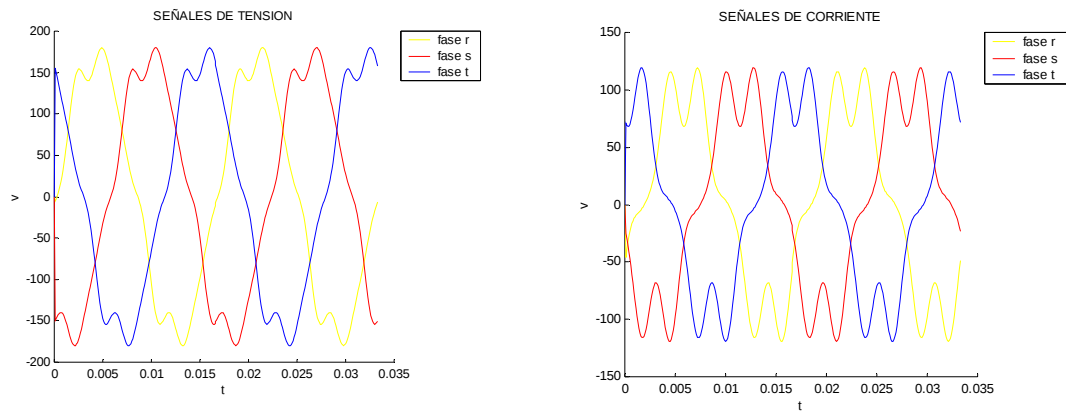


Fig. 17 Señales de tensión y corriente de entrada.

```

MATLAB Command Window
File Edit View Window Help

=====^Algoritmo de medicion ABB ref. Alpha II^=====
=====POTENCIA ACTIVA TRIFASICA=====
P3 =
    20.8423
=====POTENCIA REACTIVA TRIFASICA=====
Q3 =
    17.1195
=====POTENCIA DE DIMENSIONAMIENTO TRIFASICA=====
S3 =
    26.9718
=====FACTOR DE POTENCIA=====
Fp =
    0.7727
=====^Algoritmo de medicion SIEMENS ref. S4^=====
=====POTENCIA ACTIVA TRIFASICA=====
P3 =
    20.8423
=====POTENCIA REACTIVA TRIFASICA=====

```

Fig. 18 Valores de las potencias activa, reactiva y dimensionamiento.

4.2 CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA

Este programa permite simular las mediciones realizadas por los medidores digitales de energía en sistemas eléctricos trifásicos. No se consideraron los sistemas monofásicos, ya que los medidores digitales analizados son trifásicos, sin embargo para realizar una simulación monofásica solo habría que hacer las entradas de dos de las fases nulas.

Los resultados obtenidos con este programa permiten:

- Observar las señales de tensión y corriente de entrada.
- Obtener los valores de las potencias activa, reactiva y de dimensionamiento del medidor seleccionado.

4.2.1 Variables de programación. Con los datos de entrada, el programa obtiene las señales en el dominio del tiempo correspondientes a las componentes armónicas simuladas. Estas señales son almacenadas en memoria, y pueden ser visualizadas en pantalla, una vez se ejecuta el programa.

Las variables de cada una de las variables de tensión y corriente son:

- vr: señal en el tiempo de la tensión en la fase r.
- vs: señal en el tiempo de la tensión en la fase s.
- vt: señal en el tiempo de la tensión en la fase t.
- ir: señal en el tiempo de la corriente en la fase r.
- is: señal en el tiempo de la corriente en la fase s.
- it: señal en el tiempo de la corriente en la fase t.

4.2.2 Resultados. Teniendo en cuenta las señales de tensión y corriente simuladas por el usuario, se calculan inicialmente las potencias por fase y posteriormente las potencias trifásicas.

Los valores de las potencias eléctricas trifásicas, son mostrados por el programa al finalizar su ejecución. Si se requieren las estimaciones de las potencia por cada una de las fases, estas se obtienen digitando el nombre de la variable correspondiente a cada una de ellas:

- pr1,2,3,4 = potencia activa fase r.
- ps1,2,3,4 = potencia activa fase s.
- pt1,2,3,4 = potencia activa fase t.
- qr1,2,3,4 = potencia reactiva fase r.
- qs1,2,3,4 = potencia reactiva fase s.

- $qt_{1,2,3,4}$ = potencia reactiva fase t.
- $sr_{1,2,3,4}$ = potencia de dimensionamiento fase r.
- $ss_{1,2,3,4}$ = potencia de dimensionamiento fase s.
- $st_{1,2,3,4}$ = potencia de dimensionamiento fase t.

Los índices 1, 2, 3, 4 de estas variables corresponden a los números asignados para cada marca de los medidores digitales. Por ejemplo, ps_1 corresponde a la potencia activa de la fase s del medidor 1 (medidor ABB ref. ALPHA II).

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En esta sección se analizarán los valores de las potencias eléctricas activa, reactiva y de dimensionamiento estimados por el programa diseñado para la simulación de las mediciones eléctricas de los diferentes medidores digitales, considerando diferentes señales de entrada y condiciones del sistema eléctrico. Los resultados de potencia eléctrica obtenidos en la simulación, se compararán entre sí cualitativa y cuantitativamente, lo que permitirá establecer si las mediciones de potencia eléctrica estimadas por los medidores digitales analizados, son adecuadas o presentan errores por fuera de los límites especificados por los equipos de medición.

5.1 POTENCIAS TRIFÁSICAS DE SISTEMAS DESBALANCEADOS Y CON ARMÓNICOS

Antes de presentar los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas, se hará un análisis de las potencias en un sistema trifásico, considerando algunas condiciones especiales.

5.1.1 Sistema desbalanceado con carga resistiva. Se considera un sistema trifásico con conexión delta como se muestra en la figura 19, en el cual la carga es resistiva, desbalanceada y la tensión de fase suministrada esta equilibrada y tiene un valor eficaz de 120 V, con referencia de 0° en la fase A.

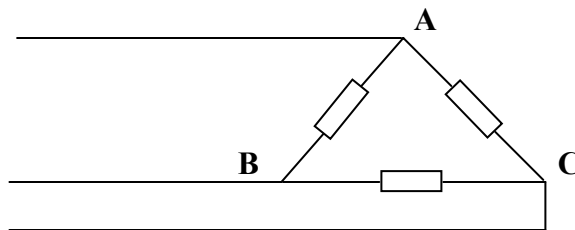


Fig. 19 Sistema trifásico en Δ .

Las tensiones de línea del sistema eléctrico son:

$$V_{AB} = \sqrt{3} \cdot 120 \angle 30^\circ$$

$$V_{BC} = \sqrt{3} \cdot 120 \angle -90^\circ$$

$$V_{CA} = \sqrt{3} \cdot 120 \angle 150^\circ$$

Las resistencias eléctricas del sistema son:

$$R_{AB} = \sqrt{3} \cdot 120 \, \Omega$$

$$R_{BC} = 5 \cdot R_{AB} \, \Omega$$

$$R_{CA} = \frac{5}{2} \cdot R_{AB} \, \Omega$$

Resolviendo el sistema se obtienen las siguientes corrientes de fase:

$$I_{AB} = 1 \angle 30^\circ$$

$$I_{BC} = 0,2 \angle -90^\circ$$

$$I_{CA} = 0,4 \angle 150^\circ$$

A partir de las corrientes de fase se tiene que las corrientes de línea son:

$$I_A = 1,249 \angle 13,898^\circ$$

$$I_B = 1,114 \angle -141,052^\circ$$

$$I_C = 0,52915 \angle 130,8934^\circ$$

Los consumos de potencia del sistema trifásico arrojan los resultados: a) $P = 332,60$ W, $Q = 99$ VAr y $S = 347,06$ VA, b) $P = 332,60$ W, $Q = 149,91$ VAr y $S = 364,82$ VA, si se aplica el modelo de corrientes ortogonales propuesta por Czarnecki. Un aspecto a tener en cuenta es que aunque la carga es resistiva la potencia de dimensionamiento es mayor a la potencia activa, es decir que debido al desbalance el sistema tiene un factor de potencia menor a la unidad.

Comparando los dos resultados de los literales a y b se concluye que la potencia activa es igual pero que las potencias reactiva y de dimensionamiento tienen diferentes resultados.

Por lo general los medidores de energía no son diseñados para estimar adecuadamente la potencia debida al desbalance del sistema, como se corroborará con los resultados de los sistemas simulados en este capítulo, ya que los valores corresponden en este ejemplo a los dados en el literal a en algunos medidores y en otra a otras estimaciones diferentes a la obtenida mediante el modelo de corrientes ortogonales.

5.1.2 Sistema trifásico balanceado con carga no lineal. El otro caso de interés es un sistema trifásico equilibrado que alimenta una carga balanceada no lineal que genera armónicos de corriente de orden 3, 5, 7 y 9. La tabla 5 muestra los valores de estos armónicos.

Los resultados de las potencias de este sistema trifásico son:

a) $P = 21,23 \text{ kW}$, $Q = 14,88 \text{ kVAr}$ y $S = 32,63 \text{ kVA}$; si se suman los consumos de potencias activa, reactiva y de dimensionamiento de cada fase, b) $P = 21,23 \text{ kW}$, $Q = 24,77 \text{ kVAr}$ y $S = 32,63 \text{ kVA}$ según el modelo de corrientes ortogonales.

Como se puede apreciar en estos dos literales hay una diferencia en la estimación de la potencia reactiva. Es decir que debido a los armónicos generados por la carga no lineal se incrementa la potencia de dimensionamiento, al igual que con el desbalance del sistema trifásico, la mayoría de los medidores digitales no estiman adecuadamente esta potencia adicional, como se establecerán posteriormente al analizar los resultados de las simulaciones.

5.2 DATOS DE ENTRADA DE LAS SIMULACIONES

Los datos de entrada utilizados en las simulaciones corresponden a algunas mediciones previamente realizadas en diferentes tipos de instalaciones eléctricas y a señales sintetizadas para simular diferentes tipos de situaciones como:

- Sistema trifásico de una única frecuencia desbalanceado.
- Sistema trifásico balanceado con armónicos en corriente.
- Sistema trifásico balanceado con armónicos comunes en tensión y corriente.
- Sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes en tensión y corriente.
- Sistema trifásico balanceado con contenido de armónicos en tensión y corriente y carga no lineal (computadores).

Cada una de las situaciones simuladas presenta características diferentes de los sistemas, lo que permitirá establecer el comportamiento de los algoritmos ante diferentes escenarios de funcionamiento. De esta manera, se analizarán bajo que condiciones se podrían obtener mediciones con márgenes de error permitidos y bajo que condiciones estos errores se incrementan hasta el punto que las estimaciones de energía estimadas por los diferentes medidores digitales sobrepasen los márgenes de error referenciados por el equipo.

5.2.1 Escenario 1. Para efectos de este documento, este tipo de conexión será llamada “conexión 1” y en ella se considera que el medidor digital ha sido instalado en un sistema trifásico, utilizando tres transformadores de potencial y tres transformadores de corriente, es decir que la tensión aplicada a las bobinas de tensión de los medidores corresponden a las tensiones de fase del sistema.

En las figuras 20 a 24 se muestran las formas de onda de tensión y corriente suministradas al medidor digital de cada uno de los cinco sistemas trifásicos simulados.

5.2.1.1 Sistema trifásico sin neutro. A continuación, en las tablas 2, 3, y 4 se muestran los valores de tensión y corriente de los sistemas eléctricos que serán analizados y que corresponden a los datos de entrada. Los datos de estas tablas corresponden a un sistema trifásico sin neutro.

Tabla 2. Sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado.

Fase	Armónico	Vrms (V)	$\angle V$ (grados)	Irms (A)	$\angle I$ (grados)
R	1	120	0	232	-10
S	1	120	-120	102	-130
T	1	120	120	201.4	144

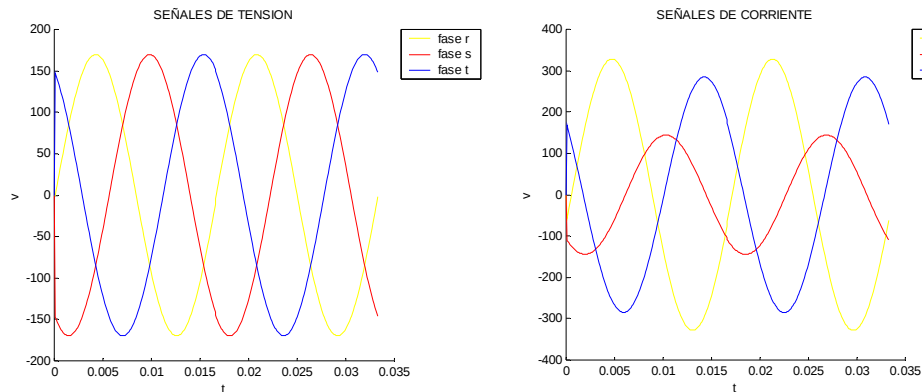


Fig. 20 Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado.

Tabla 3. Sistema trifásico desbalanceado con armónicos de tensión y corriente.

Fase	Armónico	Vrms (V)	$\angle V$ (grados)	Irms (A)	$\angle I$ (grados)
R	1	120	0	232	-10
	5	10%	-130	6,5%	-200
	7	5%	120	7%	40
S	1	120	-120	102	-130
	5	10%	-10	11,8%	80
	7	5%	0	10%	-70
T	1	120	120	201.4	144
	5	10%	110	10,4%	-54,62
	7	5%	-120	7,9%	-176,93

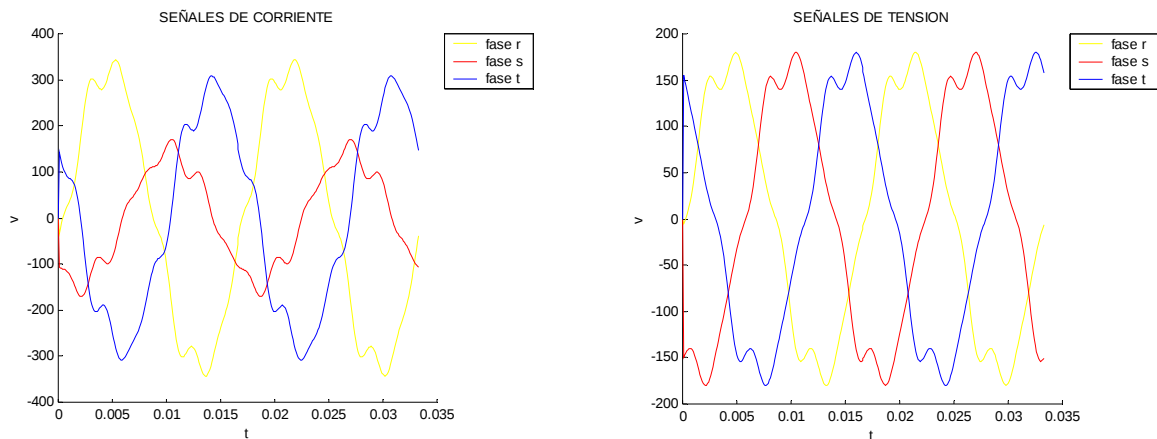


Fig. 21 Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico desbalanceado con armónicos de tensión y corriente.

Tabla 4. Sistema trifásico balanceado con armónicos de tensión y corriente.

Fase	Armónico	Vrms (V)	$\angle V$ (grados)	Irms (A)	$\angle I$ (grados)
R	1	120	0	72	-35
	5	10%	-130	25%	10
	7	5%	120	8,33%	110
S	1	120	-120	72	-155
	5	10%	-10	25%	130
	7	5%	0	8,33%	-10
T	1	120	120	72	85
	5	10%	110	25%	-110
	7	5%	-120	8,33%	-130

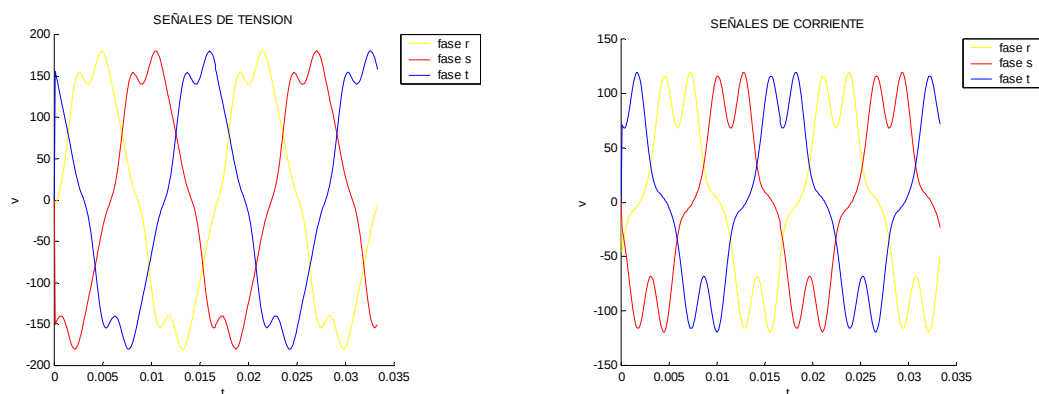


Fig. 22 Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico balanceado con armónicos de tensión y corriente.

5.2.1.2 Sistema trifásico con neutro. Aunque la conexión de un medidor digital por lo general se realizan en el primario del transformador de potencia (sistema de tres hilos), en algunos casos esta conexión puede realizarse en el secundario del transformador de potencia (sistema de cuatro hilos con neutro). A continuación, en las tablas 5 y 6 se muestran los valores de tensión y corriente para esta situación.

Tabla 5. Sistema trifásico balanceado con armónicos de corriente.

Fase	Armónico	Vrms (V)	$\angle V$ (grados)	Irms (A)	$\angle I$ (grados)
R	1	120	0	72	-35
	3	-	-	75%	150
	5	-	-	4%	10
	7	-	-	8,33%	110
	9	-	-	11,67%	-60
S	1	120	-120	72	-155
	3	-	-	75%	150
	5	-	-	4%	130
	7	-	-	8,33%	-10
	9	-	-	11,67%	-60
T	1	120	120	72	85
	3	-	-	75%	150
	5	-	-	4%	-110
	7	-	-	8,33%	-130
	9	-	-	11,67%	-60

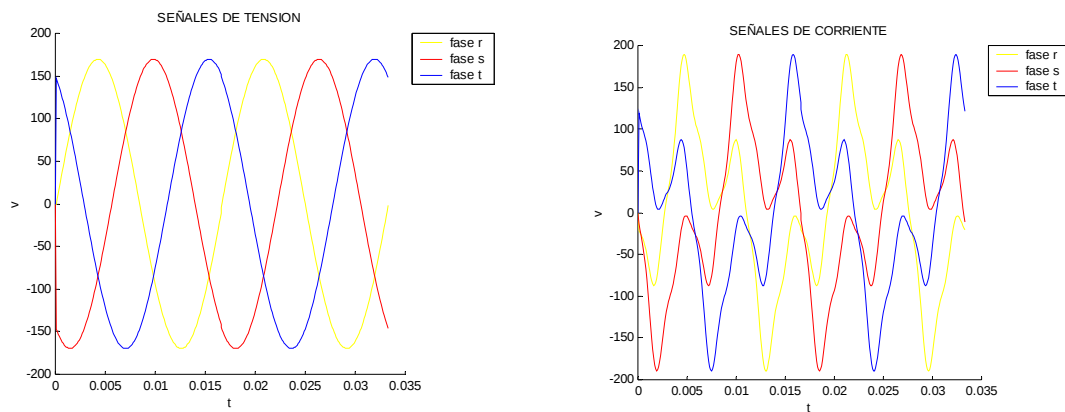


Fig. 23 Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico balanceado con armónicos de corriente.

Tabla 6. Sistema trifásico desbalanceado con contenido de armónicos en tensión y corriente y carga no lineal (computadores).

Fase	Armónico	Vrms (V)	$\angle V$ (grados)	Irms (A)	$\angle I$ (grados)
R	1	120	0	60	-35
	3	-	-	75%	150
	5	10%	-130	25%	10
	7	5%	120	8,33%	110
	9	-	-	11,67%	-60
	11	-	-	5%	130
	13	-	-	5%	-125
	15	-	-	5%	75
S	1	120	-120	45	-155
	3	-	-	75%	150
	5	10%	-10	24.44%	130
	7	5%	0	8.88%	-10
	9	-	-	11.11%	-60
	11	-	-	4.44%	-110
	13	-	-	4.44%	115
	15	-	-	4.44%	75
T	1	120	120	72	85
	3	-	-	75%	150
	5	10%	110	25%	-110
	7	5%	-120	8,33%	-130
	9	-	-	11,81%	-60
	11	-	-	5%	10
	13	-	-	5%	-5
	15	-	-	5%	75

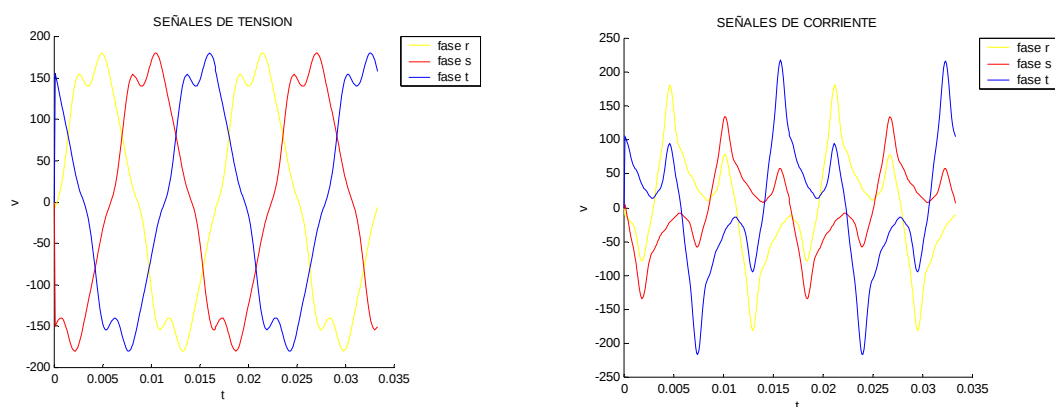


Fig. 24 Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico desbalanceado con contenido en armónicos de tensión y corriente y carga no lineal (computadores).

5.2.2 Escenario 2. En las tablas 7, 8 y 9 se muestran los valores de tensión y corriente de los sistemas eléctricos simulados en las tablas 2, 3 y 4, con la diferencia que las tensiones utilizadas son las de línea y no de fase y que las estimaciones de potencia se obtienen sumando las estimaciones obtenidas con dos de los tres elementos del medidor digital. Es decir que a los medidores digitales se les realiza la conexión Aron, considerando que el sistema trifásico es de tres hilos. Este tipo de conexión es común en las fronteras de los clientes no regulados de la ESSA E.S.P y con ella se requiere la utilización de cuatro transformadores de medida: dos PTs y dos CTs.

Las figuras 24 a 26 muestran las formas de onda de la tensión y corriente que se aplican a los medidores digitales cuando se realiza la conexión Aron. La corriente y tensión de la fase no analizada, el medidor las considera nulas (en las graficas se considera que la fase T es tomada como referencia ($I_T = 0$)).

Tabla 7. Sistema trifásico de una única frecuencia desbalanceado y medidor conectado en conexión Aron.

Línea	Armónico	Vrms (V)	$\angle V$ (grados)	Fase	Irms (A)	$\angle I$ (grados)
RS	1	207.8	30	R	232	-10
ST	1	207.8	-90	S	102	-130
TR	1	207.8	150	T	201.4	144

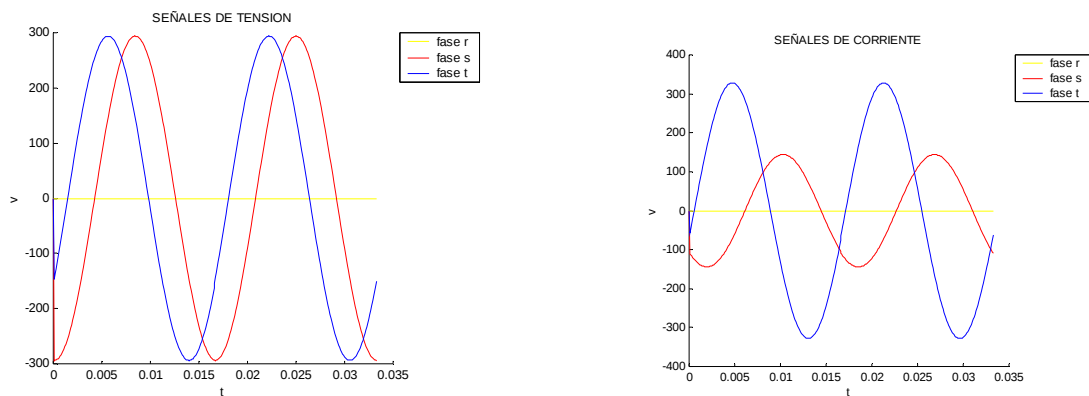


Fig. 25 Tensión y corriente en el medidor digital de un sistema trifásico de una única frecuencia desbalanceado y considerando conexión Aron en el medidor tomando como referencia la fase T ($I_T = 0$).

Tabla 8. Sistema trifásico balanceado con armónicos en corriente y medidor conectado en Aron.

Línea	Armónico	Vrms (V)	$\angle V$ (grados)	Fase	Irms (A)	$\angle I$ (grados)
RS	1	207.8	30	R	72	-35
	5	10%	-160		25%	10
	7	5%	150		8,3%	110
ST	1	207.8	-90	S	72	-155
	5	10%	-40		25%	130
	7	5%	30		8,3%	-10
TR	1	207.8	150	T	72	85
	5	10%	80		25%	-110
	7	5%	-90		8,3%	-130

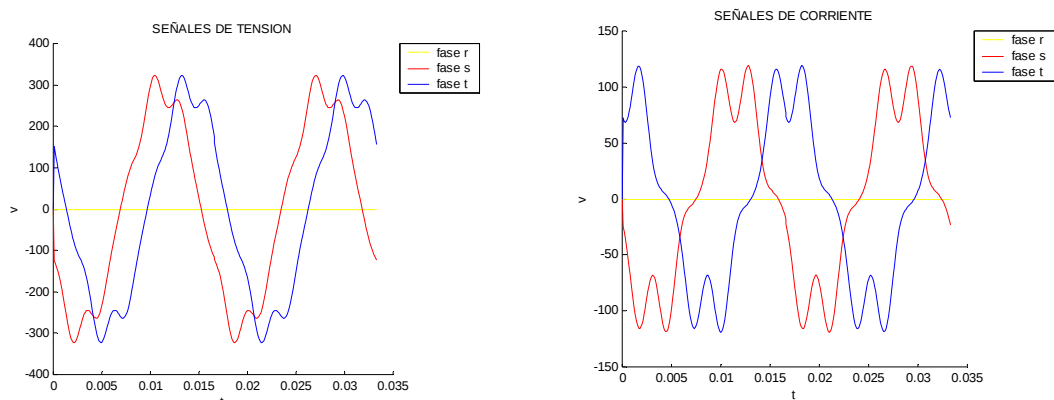


Fig. 26 Tensión y corriente en el medidor digital de un sistema trifásico balanceado con armónicos en tensión y corriente y considerando conexión Aron en el medidor y tomando como referencia para la conexión la fase T ($I_T = 0$).

Tabla 9. Sistema trifásico desbalanceado con contenido de armónicos en tensión y corriente (carga no lineal) y medidor conectados en conexión Aron.

Línea	Armónico	Vrms (V)	$\angle V$ (grados)	Fase	Irms (A)	$\angle I$ (grados)
RS	1	207.8	30	R	232	-10
	5	10%	-160		6,5%	-200
	7	5%	150		7%	40
ST	1	207.8	-90	S	102	-130
	5	10%	-40		11,8%	80
	7	5%	30		10%	-70
TR	1	207.8	150	T	201,4	144
	5	10%	140		10,4%	-54,6
	7	5%	80		7,9%	-176,9

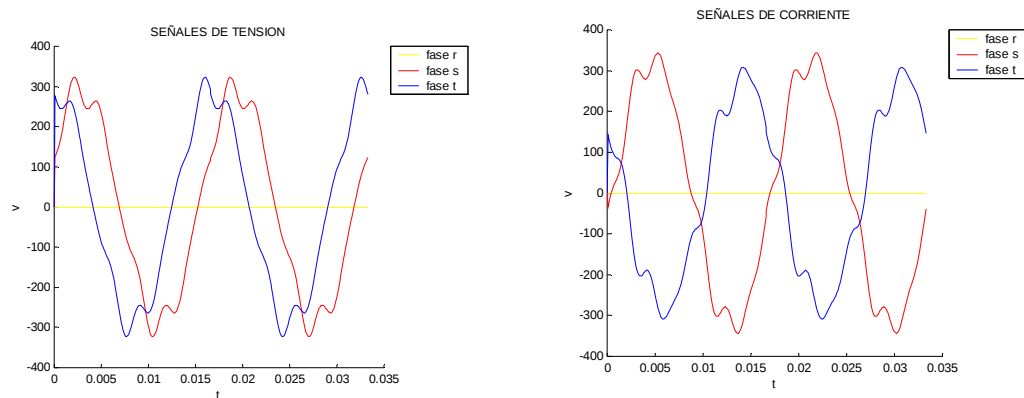


Fig. 27 Tensión y corriente en el medidor digital para un sistema trifásico desbalanceado con armónicos de tensión y corriente considerando la conexión Aron en el medidor y tomando como referencia para la conexión la fase T ($I_T = 0$).

5.3 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN

5.3.1 Resultados del escenario 1. Los resultados obtenidos en simulación de los valores de las potencias activa (P), reactiva (Q) y de dimensionamiento (S) así como el factor de potencia (F.P) son mostrados en las tablas 10 y 11 para los sistemas trifásicos de tres y cuatro hilos respectivamente.

Tabla 10. Potencias eléctricas de sistemas trifásicos sin neutro (tres hilos).

Sistema trifásico de una única frecuencia desbalanceado				
MEDIDOR	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)	F.P.
ABB	61,55	16,79	64,25	0,9580
SIEMENS	61,55	-2,87	64,25	0,9580
EMH-ELGAMA	61,55	-2,87	64,25	0,9989
SCHLUMBERGER	61,55	-2,87	64,25	0,9580
Sistema trifásico balanceado con armónicos comunes de tensión y corriente				
ABB	20,85	17,12	26,97	0,7727
SIEMENS	20,85	14,79	26,97	0,7727

EMH-ELGAMA	20,85	14,43	25,35	0,8221
SCHLUMBERGER	20,85	14,43	25,35	0,8221
Sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes de tensión y corriente				
ABB	61,46	20,14	65,13	0,9437
SIEMENS	61,46	-2,82	65,13	0,9437
EMH-ELGAMA	61,46	-3,01	64,16	0,9988
SCHLUMBERGER	61,46	-3,01	64,16	0,9579

Tabla 11. Potencias eléctricas de sistemas trifásicos con neutro (cuatro hilos).

Sistema trifásico balanceado con armónicos de corriente				
ABB	21,23	24,78	32,63	0,6507
SIEMENS	21,23	14,87	32,63	0,6507
EMH-ELGAMA	21,23	14,87	25,92	0,8192
SCHLUMBERGER	21,23	14,87	25,92	0,8192
Sistema trifásico desbalanceado con contenido de armónicos de tensión y corriente				
ABB	17,08	21,51	27,47	0,6219
SIEMENS	17,08	12,12	27,47	0,6219
EMH-ELGAMA	17,08	11,83	20,78	0,8222
SCHLUMBERGER	17,08	11,83	20,78	0,8222

5.3.2 Resultados del escenario 2. Las potencias estimadas por los medidores digitales cuando la conexión realizada es la Aron y teniendo en cuenta las diferentes posibilidades de conexión se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Potencias eléctricas obtenidas en simulación considerando la conexión Aron.

Sistema trifásico de única frecuencia desbalanceado (ref. fase R)				
MEDIDOR	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)	F.P.
ABB	61,54	11,62	63,05	0,9761
SIEMENS	61,54	-2,87	63,05	0,9761
EMH-ELGAMA	61,54	-2,87	63,05	0,9989
SCHLUMBERGER	61,54	-2,87	63,05	0,9761
Sistema trifásico de única frecuencia desbalanceado (ref. fase S)				
ABB	61,53	64,8466	90,0605	0,6832
SIEMENS	61,53	-2,8696	90,0605	0,6832
EMH-ELGAMA	61,53	-2,8696	90,0605	0,9989
SCHLUMBERGER	61,53	-2,8696	90,0605	0,6832
Sistema trifásico de única frecuencia desbalanceado (ref. fase T)				
ABB	61,54	30,11	69,40	0,8867
SIEMENS	61,54	-2,86	69,40	0,8867
EMH-ELGAMA	61,54	-2,86	69,40	0,9989
SCHLUMBERGER	61,54	-2,86	69,40	0,8867
Sistema trifásico balanceado con armónicos de tensión y corriente (ref. fase R)				
ABB	20,84	19,09	31,14	0,6692
SIEMENS	20,84	14,78	31,14	0,6692
EMH-ELGAMA	20,84	14,43	29,60	0,8221
SCHLUMBERGER	20,84	14,43	29,60	0,7040
Sistema trifásico balanceado con armónicos de tensión y corriente (ref. fase S)				
ABB	20,84	19,09	31,14	0,6692
SIEMENS	20,84	14,78	31,14	0,6692
EMH-ELGAMA	20,84	14,43	29,60	0,8221
SCHLUMBERGER	20,84	14,43	29,60	0,7040
Sistema trifásico balanceado con armónicos de tensión y corriente (ref. fase T)				
ABB	20,84	19,09	31,14	0,6692

SIEMENS	20,84	14,79	31,14	0,6692
EMH-ELGAMA	20,84	14,49	29,60	0,8221
SCHLUMBERGER	20,84	14,49	29,60	0,7040
Sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes de tensión y corriente (ref. fase R)				
ABB	61,45	17,59	64,05	0,9594
SIEMENS	61,45	-2,82	64,05	0,9594
EMH-ELGAMA	61,45	-3,015	63,06	0,9988
SCHLUMBERGER	61,45	-3,015	63,06	0,9745
Sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes de tensión y corriente (ref. fase S)				
ABB	61,44	66,39	91,20	0,6737
SIEMENS	61,44	-2,818	91,20	0,6737
EMH-ELGAMA	61,44	-3,011	90,22	0,9988
SCHLUMBERGER	61,44	-3,011	90,22	0,6810
Sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes de tensión y corriente (ref. fase T)				
ABB	61,45	32,20	70,31	0,8740
SIEMENS	61,45	-2,81	70,31	0,8740
EMH-ELGAMA	61,45	-3,01	69,08	0,9988
SCHLUMBERGER	61,45	-3,01	69,08	0,8896

5.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

El porcentaje de los errores se obtienen utilizando la ecuación:

$$\varepsilon\% = \frac{\text{Valor estimado} - \text{Valor verdadero}}{\text{Valor verdadero}} \times 100\% \quad (52)$$

Una vez obtenidos los resultados de la simulación, se analizan los errores en la estimación de las potencias teniendo en cuenta las dos posibles conexiones de un medidor digital. Se toma como estimación verdadera los resultados obtenidos de potencias aplicando el modelo de corrientes ortogonales propuesto por Czarnecki, el cual ha sido validado para sistemas trifásicos de 3 hilos. En la tabla 13 se muestran estas estimaciones.

Tabla 13. Resultados de la teoría de Czarnecki.

P(kW)	Q _m (kVAm)	D _s (kVAs)	D _u (kVAu)	D _g (kVAg)	Q _F (kVAr)	S(kVA)	F.P
Sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado							
61,55	2,87	-	15,60	-	15,86	63,56	0,9684
Sistema trifásico balanceado con armónicos comunes de tensión y corriente							
20,84	15,54	7,18	-	-	17,12	26,97	0,7991
Sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes de tensión y corriente							
61,46	2,90	8,06	27,79	-	29,08	67,99	0,9039
Sistema trifásico balanceado de cuatro hilos con armónicos de corriente							
21,23	14,86	-	-	19,82	24,77	32,63	0,6507
Sistema trifásico desbalanceado de cuatro hilos con contenido de armónicos de tensión y corriente							
5,79	4,31	0,64	-	5,53	7,05	9,12	0,6347
4,34	3,23	0,41	-	4,14	5,27	6,83	0,6362
7,33	5,18	0,71	-	6,64	8,45	11,19	0,6551

En la tabla 14 se muestran los errores porcentuales en la evaluación de las potencias eléctricas para cada uno de los medidores digitales y considerando que los elementos del medidor sensan las tres tensiones y las tres corrientes de línea.

Tabla 14. Errores porcentuales en el escenario 1.

Sistema trifásico de única frecuencia y desbalanceado				
MEDIDOR	P (ε%)	Q (ε%)	S (ε%)	F.P. (ε%)
ABB	0	5,86	1,08	-1,07
SIEMENS	0	-118,10	1,08	-1,07
EMH-ELGAMA	0	-118,10	1,08	3,15
SCHLUMBERGER	0	-118,10	1,08	-1,07

Sistema trifásico balanceado con armónicos de corriente				
ABB	0	0	0	0
SIEMENS	0	-39,99	0	0
EMH-ELGAMA	0	-39,99	-20,56	25,89
SCHLUMBERGER	0	-39,99	-20,56	25,89
Sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes de tensión y corriente				
ABB	0	-30,76	-4,21	4,40
SIEMENS	0	-109,69	-4,21	4,40
EMH-ELGAMA	0	-110,35	-5,64	10,50
SCHLUMBERGER	0	-110,35	-5,64	5,97
Sistema trifásico balanceado de cuatro hilos con armónicos comunes de tensión y corriente				
ABB	0	0	0	0
SIEMENS	0	-13,62	0	0
EMH-ELGAMA	0	-15,69	-6,00	6,38
SCHLUMBERGER	0	-15,69	-6,00	6,38
Sistema trifásico desbalanceado de cuatro hilos con contenido de armónicos de tensión y corriente				
ABB	0	3,57	1,22	-1,20
SIEMENS	0	-41,66	1,22	-1,20
EMH-ELGAMA	0	-43,05	-23,44	30,62
SCHLUMBERGER	0	-43,05	-23,44	30,62

La tabla 15 muestra los errores porcentuales en la estimación de las potencias eléctricas para cada uno de los medidores cuando la conexión realizada es la Aron, es decir se sensan dos tensiones de línea y dos corrientes de línea.

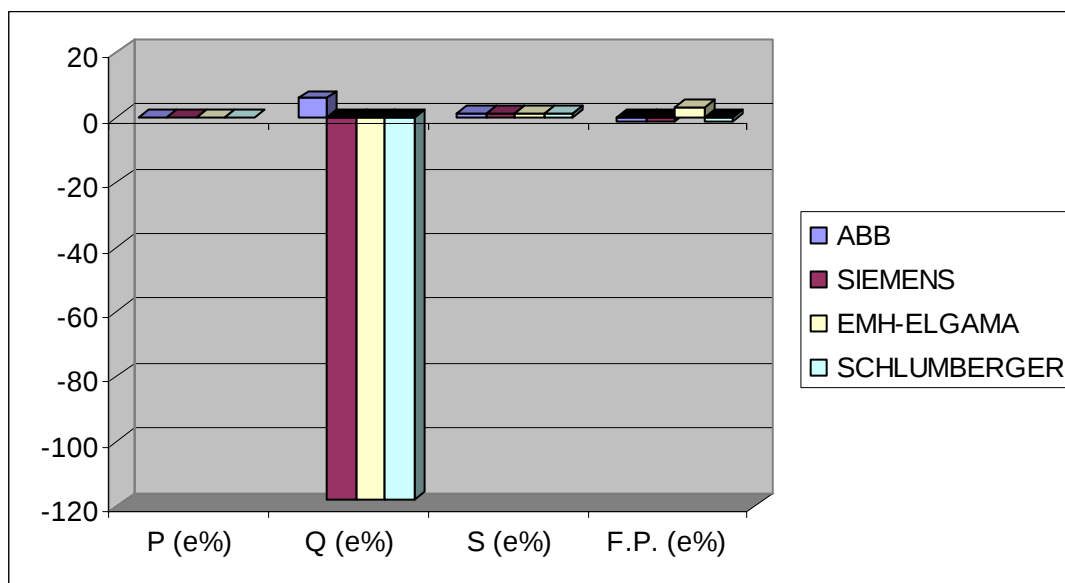


Fig 28. Errores porcentuales de un sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado.

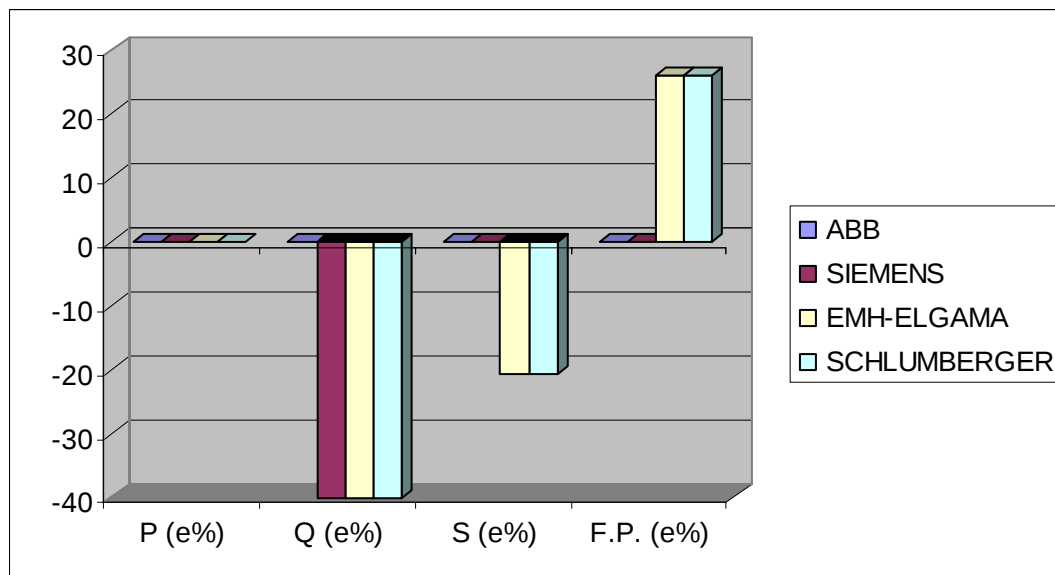


Fig 29. Errores porcentuales de un sistema trifásico balanceado con armónicos de corriente.

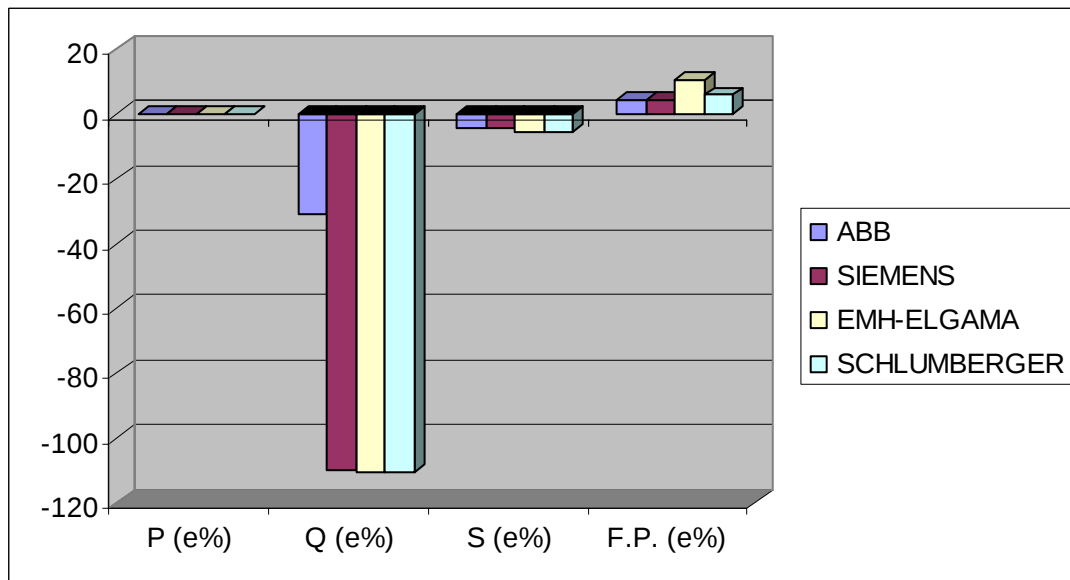


Fig 30. Errores porcentuales de un sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes de tensión y corriente.

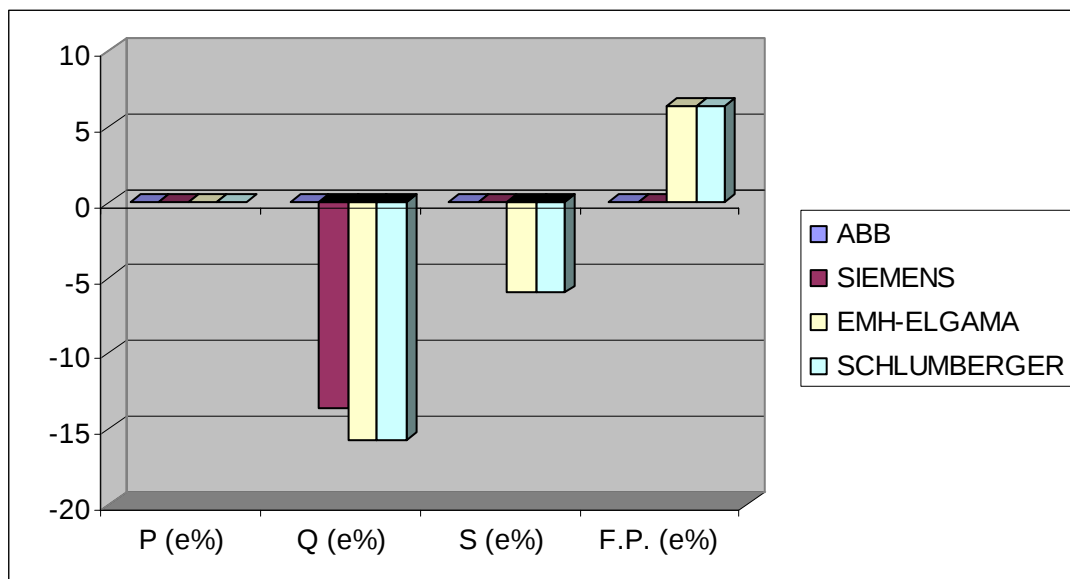


Fig 31. Errores porcentuales de un sistema trifásico balanceado de cuatro hilos con armónicos comunes de tensión y corriente.

Tabla 15. Errores porcentuales del escenario 2 (conexión Aron).

Sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado (ref. fase R)				
MEDIDOR	P (ε%)	Q (ε%)	S (ε%)	F.P. (ε%)
ABB	0	-26,71	-0,81	0,795
SIEMENS	0	-118,12	-0,81	0,795
EMH-ELGAMA	0	-118,12	-0,81	3,150
SCHLUMBERGER	0	-118,12	-0,81	0,795
Sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado (ref. fase S)				
ABB	0	308,85	41,69	-29,451
SIEMENS	0	-118,09	41,69	-29,451
EMH-ELGAMA	0	-118,09	41,69	3,150
SCHLUMBERGER	0	-118,09	41,69	-29,451
Sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado (ref. fase T)				
ABB	0	89,86	9,20	-8,437
SIEMENS	0	-118,06	9,20	-8,437
EMH-ELGAMA	0	-118,06	9,20	3,150
SCHLUMBERGER	0	-118,06	9,20	-8,437
Sistema trifásico balanceado con armónicos comunes de tensión y corriente (ref. fase R)				
ABB	0	11,50	15,45	-13,406
SIEMENS	0	-13,64	15,45	-13,406
EMH-ELGAMA	0	-15,71	9,75	6,3790
SCHLUMBERGER	0	-15,71	9,75	-8,9026
Sistema trifásico balanceado con armónicos comunes de tensión y corriente (ref. fase S)				
ABB	0	11,50	15,45	-13,406
SIEMENS	0	-13,64	15,45	-13,406
EMH-ELGAMA	0	-15,71	9,75	6,3790
SCHLUMBERGER	0	-15,71	9,75	-8,9026

Sistema trifásico balanceado con armónicos comunes de tensión y corriente (ref. fase T)				
ABB	0	11,50	15,45	-13,406
SIEMENS	0	-13,64	15,45	-13,406
EMH-ELGAMA	0	-15,71	9,75	6,3790
SCHLUMBERGER	0	-15,71	9,75	-8,9026
Sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase R)				
ABB	0	-39,53	-5,80	6,140
SIEMENS	0	-109,71	-5,80	6,140
EMH-ELGAMA	0	-110,37	-7,26	10,499
SCHLUMBERGER	0	-110,37	-7,26	7,811
Sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase S)				
ABB	0	128,27	34,13	-25,468
SIEMENS	0	-109,69	34,13	-25,468
EMH-ELGAMA	0	-110,35	32,68	10,499
SCHLUMBERGER	0	-110,35	32,68	-24,660
Sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase T)				
ABB	0	10,67	3,40	-3,308
SIEMENS	0	-109,67	3,40	-3,308
EMH-ELGAMA	0	-110,33	1,60	10,499
SCHLUMBERGER	0	-110,33	1,60	-1,582

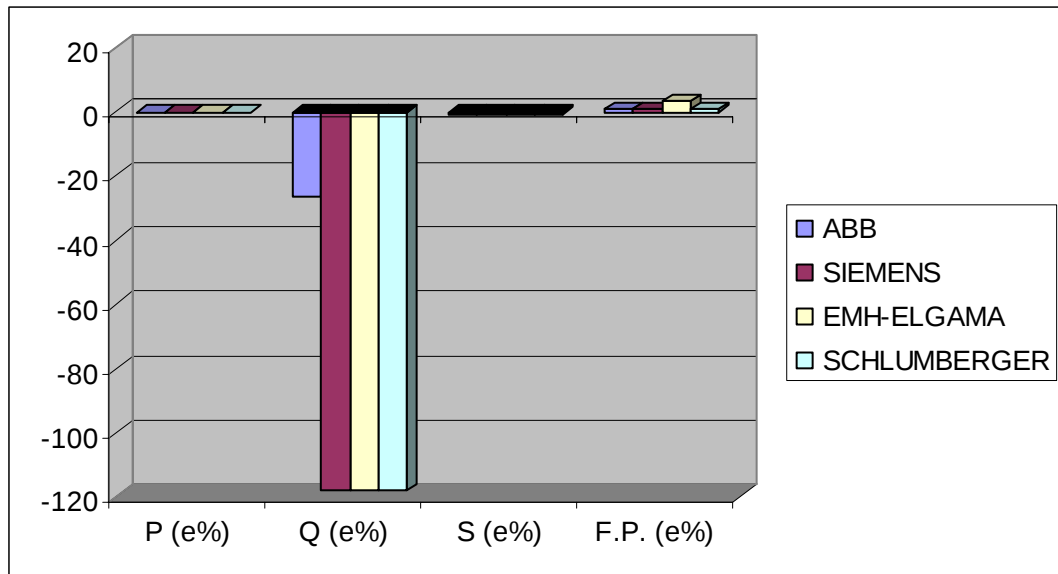


Fig. 32 Errores porcentuales de un sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado (ref. fase R).

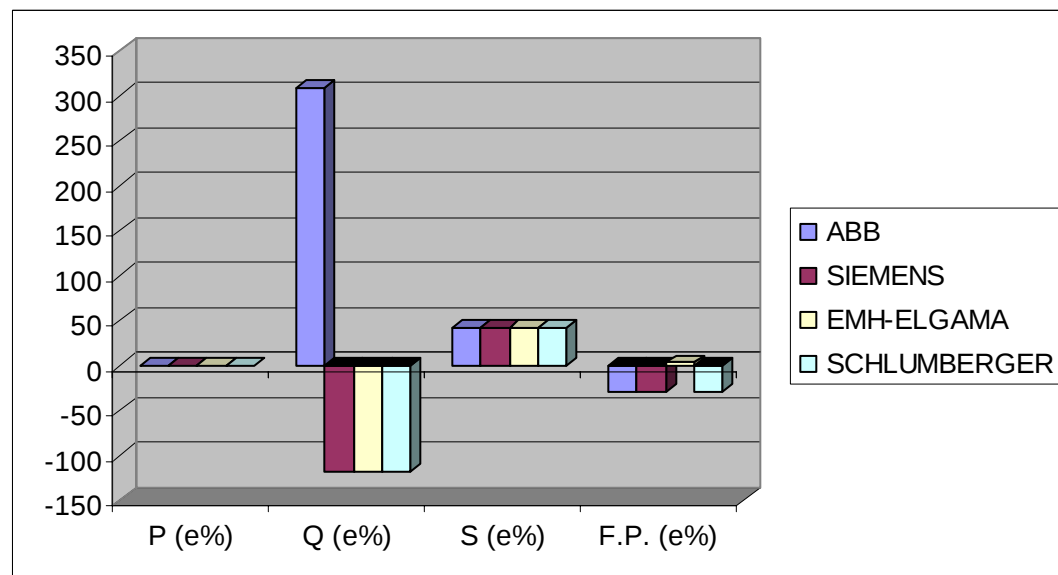


Fig. 33 Errores porcentuales de un sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado (ref. fase S).

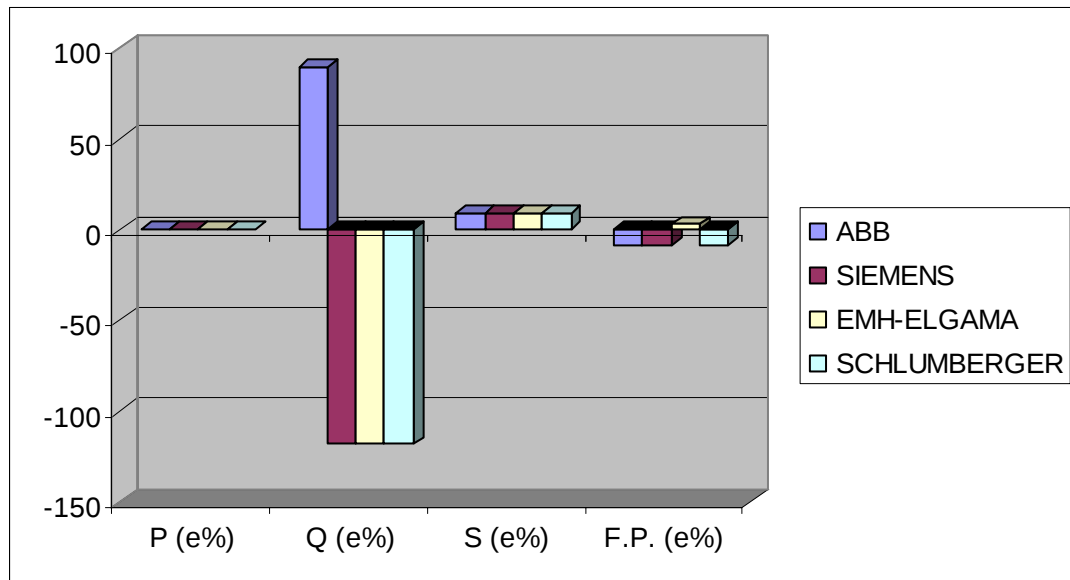


Fig. 34 Errores porcentuales de un sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado (ref. fase T).

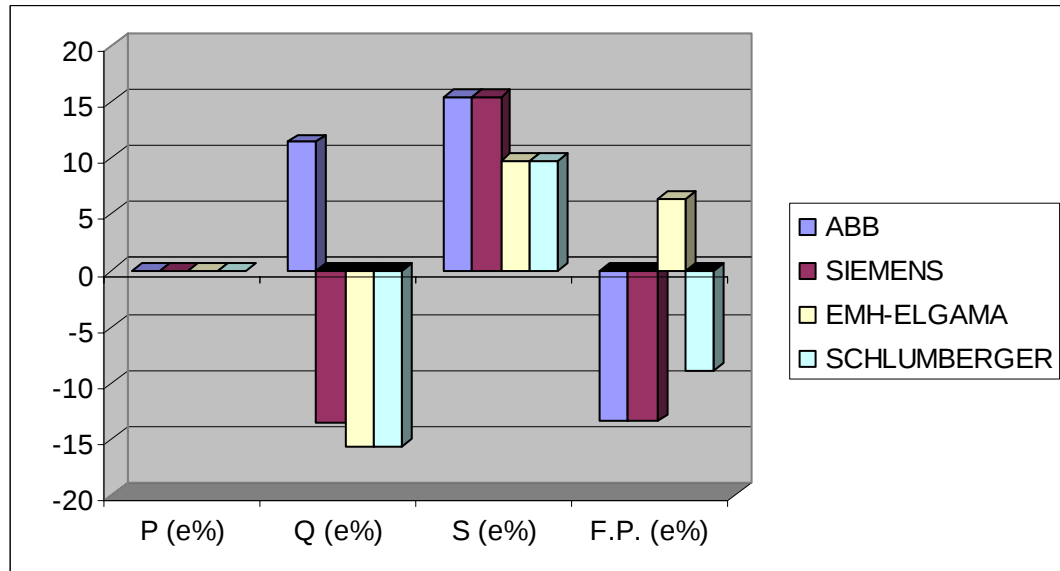


Fig. 35 Errores porcentuales de un sistema trifásico balanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase R).

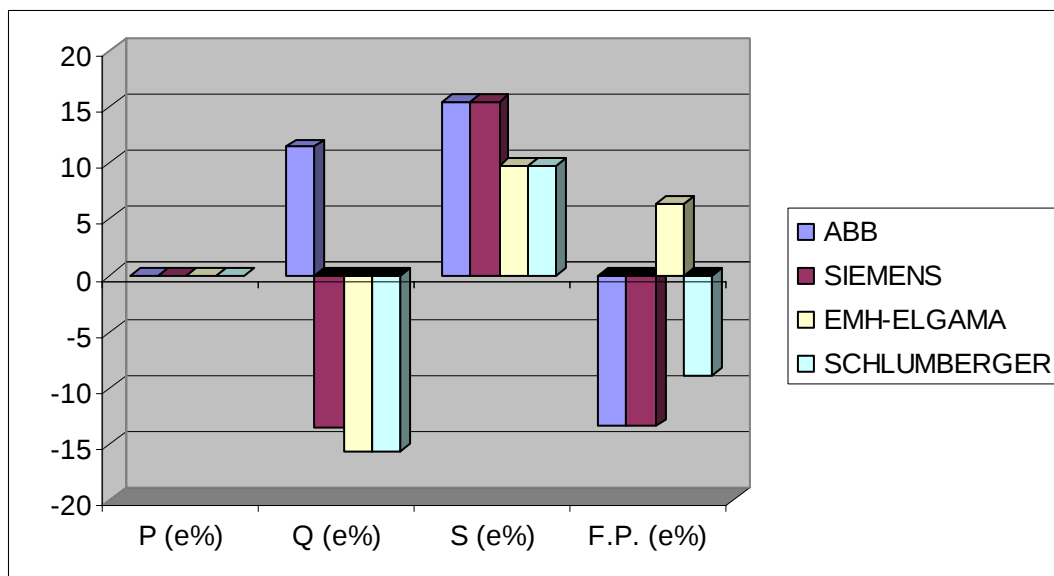


Fig. 36 Errores porcentuales de un sistema trifásico balanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase S).

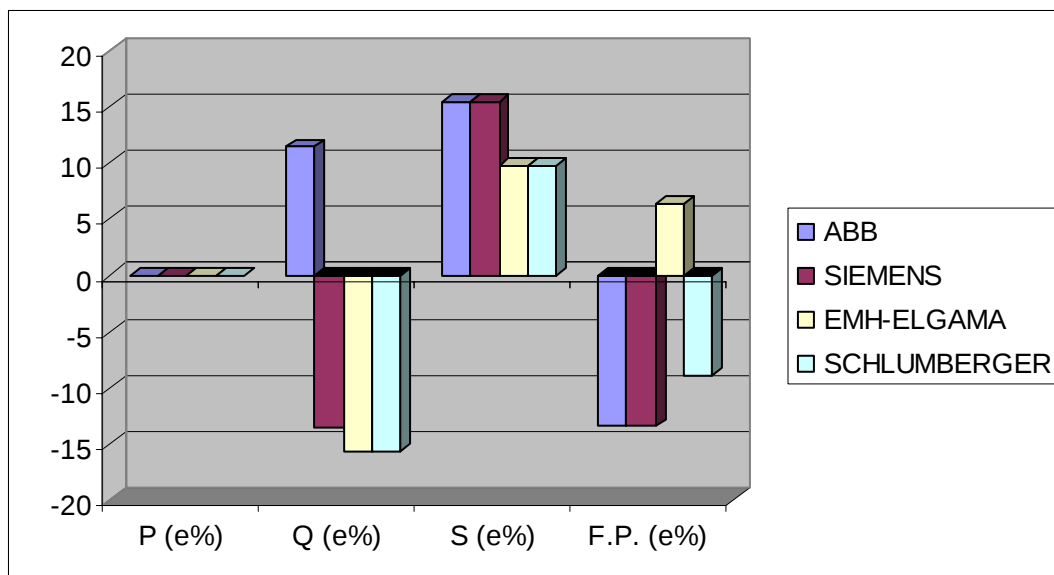


Fig. 37 Errores porcentuales de un sistema trifásico balanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase T).

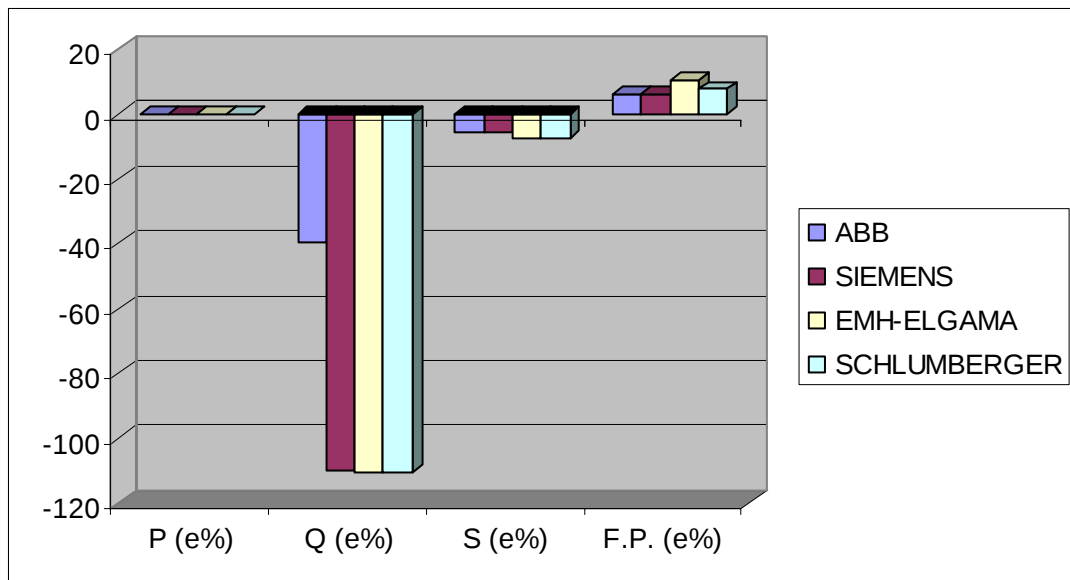


Fig. 38 Errores porcentuales de un sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase R).

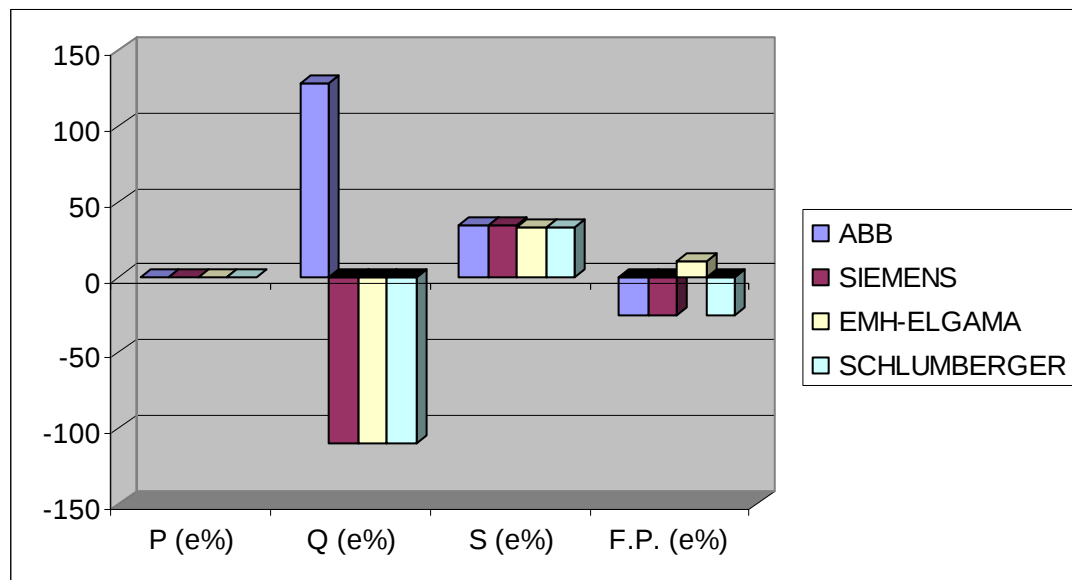


Fig. 39 Errores porcentuales de un sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase S).

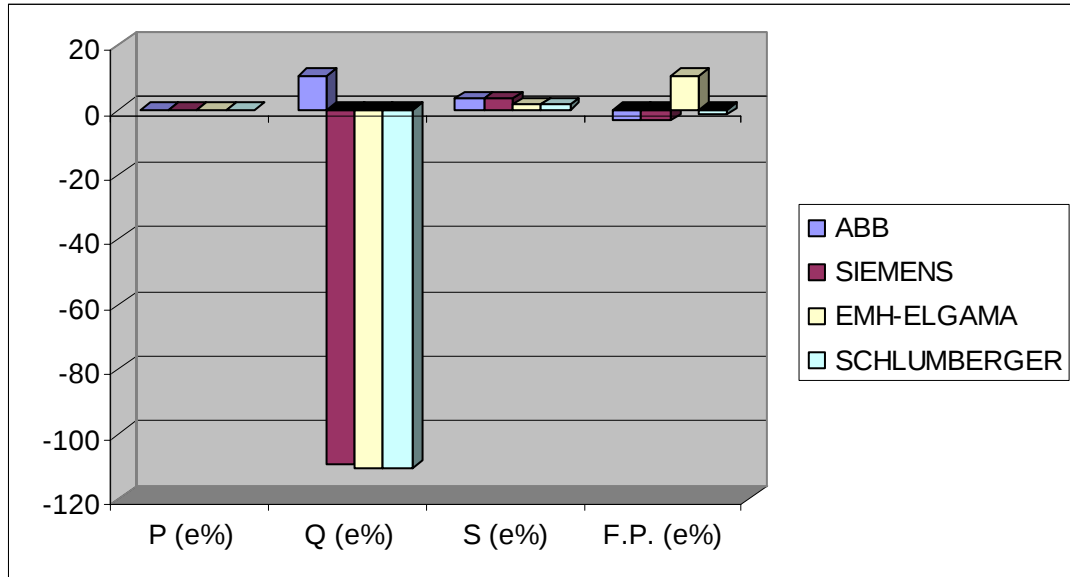


Fig. 40 Errores porcentuales de un sistema trifásico desbalanceado con armónicos comunes en tensión y corriente (ref. fase T).

5.4.1 Errores de estimación de la potencia activa. En el escenario 1, la potencia activa no presenta errores en su estimación. El valor de esta potencia coincide en los cuatro tipos de medidores estudiados en los cinco diferentes sistemas eléctricos analizados. Esto se debe a que esta potencia es calculada de la misma forma por los cuatro dispositivos de medida.

En el escenario 2, los valores de potencia activa estimados por los medidores estudiados no presentan diferencias con los resultados del escenario 1, es decir que las dos formas de conexión de los medidores es adecuada ya que los errores que se presentan dependen de las características de los dispositivos utilizados en la forma de medición.

Así mismo la medida no presenta errores adicionales ante cualquier forma de onda de tensión y corriente que se presente en el sistema sometido a medición si el ancho de banda de los acondicionadores de señal y del medidor corresponde con las frecuencias presentes en el sistema.

5.4.2 Errores en la estimación de la potencia reactiva. En el escenario 1, en los cinco diferentes sistemas eléctricos analizados la potencia reactiva verdadera es mayor que el valor estimado por los medidores SIEMENS, EMH-ELGAMA y SCHLUMBERGER. Lo que significa que estos medidores están estimando una potencia reactiva, de menor valor a la potencia que realmente esta consumiendo la carga del sistema. En los casos donde el error porcentual es negativo, la empresa suministradora de energía eléctrica esta subregistrando la potencia reactiva consumida por los clientes. Un caso crítico son los sistemas trifásicos desbalanceados, en el cual se deja de medir una gran cantidad de la potencia reactiva consumida por la carga, la cual depende del desequilibrio del sistema.

El medidor ABB ref. Alpha II hace una adecuada estimación de todas las potencias no activas debidas a: desbalance del sistema trifásico, componentes armónicas del sistema y magnetización de los materiales, la cual es estimada inadecuadamente por los medidores de las demás marcas estudiadas. Esto es debido al algoritmo que estos emplean para la medición de esta potencia. De las tres potencias eléctricas medidas, esta potencia es la que presenta los mayores errores en su proceso de medición.

En el escenario 2 se observan errores negativos en la estimación de esta potencia, lo que indica que la empresa suministradora de energía esta subregistrando esta potencia. Los errores de estimación en la medición de esta potencia en sistemas desbalanceados varían con el cambio de la tensión de referencia en la conexión implementada (Aron).

La conexión Aron introduce errores importantes en las mediciones realizadas por el medidor ABB ref. Alpha II que no se presentan cuando se realiza la conexión propuesta en el escenario 1; en los demás medidores analizados, los errores de esta conexión son similares a los errores de la conexión del escenario 1.

Para evitar que se generen nuevos errores en la estimación de la potencia reactiva, las empresas suministradoras de energía deberían establecer que sin importar el número de hilos del sistema eléctrico, siempre se debe estimar la energía utilizando la conexión propuesta en el escenario 1, es decir conectando los tres elementos de tensión y los tres elementos de corriente del equipo de medición digital. Adicionalmente, los medidores digitales deberían diseñarse de forma que el algoritmo de estimación de la potencia reactiva correspondiera al propuesto por Czarnecki y fundamentado en las componentes ortogonales de corriente, el cual realiza una estimación adecuada de las potencias no activas en sistemas trifásicos.

5.4.3 Errores de estimación de la potencia de dimensionamiento. Al igual que con la medición de la potencia reactiva se presentan errores en la estimación de la potencia de dimensionamiento. Es así como en el escenario 1, los errores encontrados varían siendo el más crítico el presentado. Los errores en la estimación de esta potencia, son menores que los obtenidos en la estimación de la potencia reactiva, pero siguen representando subregistros para la empresa electrificadora.

En el escenario 2, la conexión Aron introduce errores apreciables en la estimación de esta potencia. Estos errores son muy similares y en algunos casos iguales, para los diferentes medidores analizados. En sistemas trifásicos desbalanceados, el cambio de la tensión de referencia en la conexión Aron, genera errores de diferentes magnitudes en las mediciones de la potencia de dimensionamiento que alcanzan a ser importantes y son sobre registrados de esta potencia.

Como algunos medidores utilizan la potencia de dimensionamiento para obtener la potencia reactiva, los errores generados en la estimación de la potencia de dimensionamiento se reflejan en la estimación de la potencia reactiva.

En la obtención de los resultados de la potencia de dimensionamiento mediante la teoría de Czarnecki para los sistemas trifásicos de cuatro hilos, se plantea una discusión en cuanto a la forma más adecuada como se debiera evaluar las potencias de dimensionamiento y reactiva. La primera forma de obtener la potencia de dimensionamiento trifásica es realizando la suma aritmética de los valores por fase y la segunda es realizando la suma vectorial.

5.4.4 Factor de potencia. Los errores en la estimación de este parámetro, son tanto positivos como negativos. En el escenario 1, este factor presenta el error más crítico en el sistema trifásico desbalanceado con contenido de armónicos de tensión y corriente. En el escenario 2, la conexión Aron introduce errores en el cálculo de este factor para todos los medidores estudiados y el caso más crítico se da para el sistema trifásico de una única frecuencia y desbalanceado. En el caso del factor de potencia, el signo negativo del error porcentual puede representar potenciales cobros adicionales al usuario. Por una estimación inadecuada de este parámetro que establezca que el cliente debe pagar el consumo de reactiva cuando el factor de potencia real puede ser mayor a 0,9.

Con base en el análisis de los resultados obtenidos en la simulación no se puede afirmar, cual medidor presenta mayores errores en la obtención de la potencia eléctrica, ya que los resultados obtenidos dependen de las características del sistema eléctrico analizado y del tipo de conexión que presente el medidor digital.

5.5 ANÁLISIS DE LAS ESTIMACIONES DE POTENCIA EN UN USUARIO DE LA ESSA E.S.P

Para obtener los errores que se están presentando en la estimación de potencia y del factor de potencia y comprobar si los medidores están utilizando los algoritmos establecidos por los fabricantes en la estimación de potencia, se analizarán las lecturas obtenidas en un medidor de un cliente no regulado de la ESSA E.S.P. En la tabla 17 se muestra el consumo de potencia eléctrica de este cliente de la ESSA E.S.P, en el cual esta instalado un medidor marca EMH-ELGAMA. La obtención de estos datos, se hizo por telemedida, utilizando el “software” del medidor. Estos datos fueron proporcionados por la central de monitorización de la ESSA E.S.P. Además se muestran los valores reales de potencia, los cuales son calculados mediante los algoritmos descritos ...en la sección 3.6.1... así como los valores que teóricamente deberían obtenerse utilizando los algoritmos de estimación de este medidor. Se intentó analizar otros medidores, pero no fue posible obtener para estimar los valores reales de las potencias eléctricas. Adicionalmente, no fue posible obtener lecturas del medidor marca SIEMENS, debido a la carencia de acceso remoto para la realización de las lecturas, en los equipos instalados de esta marca.

En la figura 41 se muestran los datos obtenidos por telemedida del cliente no regulado de la ESSA E.S.P en el cual la conexión utilizada en el medidor es la Aron.

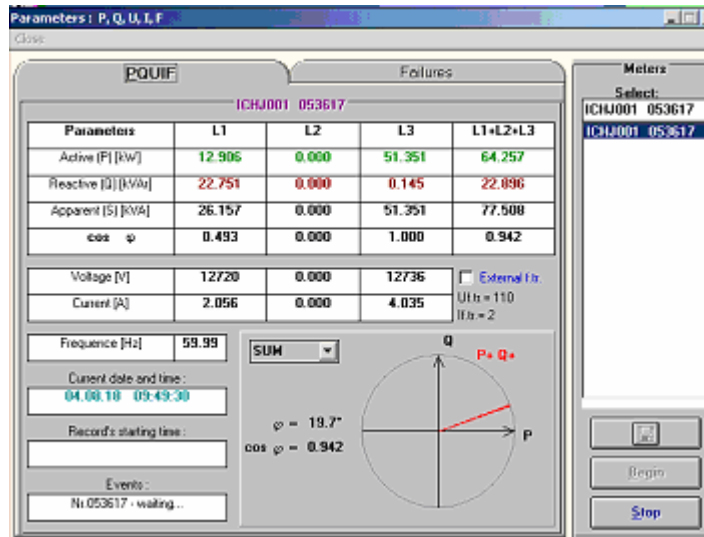


Fig. 41 Visualización de lectura del medidor EMH-ELGAMA.

Tabla 16. Resultados de potencias para un sistema con las tres fases sensadas.

FASE	POT. ACTIVA (kW)	POT. REACTIVA (kVar)	POT. APARENTE (kVA)	F.P
R	13,076	7.549	15,099	0,866
S	38.765	7,275	39.415	0,983
T	25,662	-14,816	29,633	0,865
3- φ	77,503	0,008	84,147	0,921

Para realizar el análisis de la información obtenida se indago sobre las características de la carga del cliente, considerándose que las componentes armónicas son muy bajas, motivo por el cual se hicieron las siguientes consideraciones:

- El sistema es de una única frecuencia.
- Las tensiones suministradas por la empresa están equilibradas.
- La tensión de fase R se toma como referencia y corresponde a la L1 del medidor.

Teniendo en cuenta estas consideraciones y a partir de la lectura tomada por el medidor EMH-ELGAMA (ver Fig. 41) se tienen los siguientes valores de tensión de fase y línea y de la corriente de línea:

$$V_{RS} = 12720 \angle 30^\circ \text{ V}$$

$$V_{ST} = 12720 \angle -90^\circ \text{ V}$$

$$V_{TR} = 12720 \angle 150^\circ \text{ V}$$

$$V_{RN} = 7343,89 \angle 0^\circ$$

$$V_{SN} = 7343,89 \angle -120^\circ$$

$$V_{TN} = 7343,89 \angle 120^\circ$$

$$I_R = 2,056 \angle -30^\circ \text{ A}$$

$$I_T = 4,035 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$I_S = 3,495 \angle 120,63^\circ \text{ A}$$

Con estos valores de tensión y corriente, se obtienen las potencias que se obtendrían con el medidor si la conexión se realizara teniendo en cuenta las tres tensiones de fase y las tres corrientes de línea. En la tabla 16 se presentan estos resultados.

Las potencias trifásicas estimadas teniendo en cuenta el modelo de corrientes ortogonales son las siguientes: $P = 64,397 \text{ kW}$, $Q_m = 22,080 \text{ kVA}_r$, $D_u = 25,182 \text{ kVA}_u$ y $S = 72,586 \text{ kVA}$. Si se considera como potencia reactiva la potencia no activa, las potencias para este sistema son: $P = 64,397 \text{ kW}$, $Q = 33,492 \text{ kVA}_F$, $S = 72,586 \text{ kVA}$ y $F.P = 0,8872$.

En la tabla 17 se resumen las estimaciones de potencia obtenidas de: a) la lectura del contador, b) la estimación del medidor digital si la conexión se realizara teniendo en cuenta las tres lecturas de la tensión de fase y las tres lecturas de la corriente de línea y c) las estimaciones obtenidas con el modelo de corrientes ortogonales.

Tabla 17. Consumo de potencia eléctrica de un cliente no regulado.

Medidor (EMH-ELGAMA)				
TIPO DE DATOS	POT. ACTIVA (kW)	POT. REACTIVA (kVAr)	POT. APARENTE (kVA)	F.P.
Lectura contador	64,257	22,896	77,508	0,942
Lectura contador sensando las tres fases	64,403	22,647	70,399	0,943
Estimaciones modelo de corrientes ortogonales	64,397	33,492	72,586	0.887

Comparando los resultados de la tabla 17 se observa que las estimaciones realizadas por el medidor tienen errores en las potencias reactiva y de dimensionamiento así como en el factor de potencia.

El error en la estimación de la potencia reactiva en este caso es del -31,64 % es decir la empresa esta subregistrando esta energía; en cuanto a la potencia de dimensionamiento hay un error de sobre registro del 6,78 % que afecta la estimación del factor de potencia, ya que el medidor registra que el mismo es igual 0,942 cuando en realidad su valor es 0,887. Es decir que el medidor no cobraría la potencia reactiva por estar el factor de potencia por encima de 0,9; cuando en realidad si debería cobrarse esta energía, porque en realidad el factor de potencia es 0,887.

Comparando los resultados de potencia estimados si se sensaran las tres fases con los obtenidos de la lectura del medidor se ve la inconsistencia en la potencia de dimensionamiento que en el caso de la conexión Aron es superior al valor obtenido si se sensaran las tres fases en cualquier caso estos valores son diferentes al valor obtenido con el modelo de corrientes ortogonales.

Si en la conexión Aron se cambia la fase de referencia los errores en la estimación de la potencia de dimensionamiento puede aumentar o disminuir dependiendo del desbalance que tenga las dos fases sensadas, estos errores se pueden incrementar si además del desbalance hay armónicos en el sistema. Por esta razón, es necesario que la conexión del equipo de medición de energía digital siempre realice la adquisición de las corrientes de las tres fases.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez terminado el trabajo de grado, los autores consideran importante resaltar algunas conclusiones del mismo.

En general, cuando en un sistema eléctrico se estima el consumo de energía eléctrica, no es cierto afirmar que la medida de la energía consumida tiene un pequeño margen de error cuando el equipo de medida utilizado es digital o de estado sólido. Mediante el estudio realizado a los medidores digitales instalados por la ESSA E.S.P se puede verificar que hay diferencias en los algoritmos de estimación de energía eléctrica de los medidores de las marcas estudiadas y que en algunos casos no se estiman adecuadamente las energías eléctricas.

Todos los medidores digitales analizados utilizan un algoritmo adecuado para la estimación de potencia activa independientemente de si en la conexión del medidor se sensan las corrientes de las dos fases (conexión Aron) o la de las tres fases. Para evitar que se generen nuevos errores en la estimación de la potencia reactiva y de dimensionamiento, las empresas suministradoras de energía deberían establecer que sin importar el número de hilos del sistema eléctrico, siempre se debe estimar la energía conectando los tres elementos de tensión y los tres elementos de corriente del equipo de medición digital.

Los medidores digitales presentan diferencias en cuanto al algoritmo de estimación de las potencias reactiva y de dimensionamiento. Para el caso de la potencia reactiva los medidores SIEMENS ref. S4, EMH-ELGAMA y SCHLUMBERGER ref. QUANTUM, FULCRUM y VECTRON estiman de forma errónea esta potencia, mientras que ABB ref. Alpha II la estima de forma adecuada. El algoritmo de estimación utilizado por los medidores EMH-ELGAMA y SCHLUMBERGER utilizan un algoritmo basado en la estimación realizada por medidores de inducción,

la cual es adecuada si las tensiones y corrientes del sistema son de una única frecuencia y el sistema trifásico esta balanceado y la tensión suministrada por el operador de red esta equilibrada.

Los errores en la potencia de dimensionamiento se presentan porque el algoritmo utilizado se basa en la estimación de las potencias activa y reactiva y como esta ultima es estimada de forma errónea, la potencia de dimensionamiento también es evaluada inadecuadamente.

Otra posible fuente de error es la estimación de la potencia de dimensionamiento trifásica pues en la obtención de ésta a partir de las estimaciones de cada fase se pueden presentar diferencias considerables si se realiza como la suma aritmética de las potencias de dimensionamiento de cada fase o si la estimación se realiza de forma vectorial.

De los medidores instalados por la ESSA E.S.P se puede afirmar que solo la marca ABB ref. Alpha II estima adecuadamente la totalidad de las potencias de interés para la empresa electrificadora. Los algoritmos de este medidor responden adecuadamente cuando se sensan las tres tensiones de fase y las tres corrientes de línea, pero la exactitud en la medición puede afectarse considerablemente cuando se opta por implementar la conexión Aron en los sistemas de tres hilos, donde los algoritmos de estimación de potencias reactiva y de dimensionamiento se ven afectadas en algunos casos las estimaciones presentan errores considerables.

Los medidores digitales instalados por la ESSA E.S.P no permiten realizar la monitorización del sistema eléctrico en tiempo real, es decir que no es posible a través de éstos tomar muestras de tensión y corriente que permitan estimar los índices por ejemplo de la calidad de onda de las señales de tensión y corriente.

En los niveles de tensión de 230 kV y 115 kV, en los cuales se realizan las transacciones más altas de potencia, la ESSA E.S.P tiene instalados medidores SCHLUMBERGER ref. QUANTUM, FULCRUM Y VECTRON, los cuales presentan errores en la estimación de las potencias reactiva y de dimensionamiento y del factor de potencia, errores que pasan el límite permisible por la clase del medidor.

En cuanto a nuestra formación personal, la realización de este proyecto ha complementado nuestra formación profesional ya que nos ha permitido abordar un problema de Ingeniería Eléctrica en el área de las mediciones eléctricas, permitiéndonos revisar los conceptos adquiridos en el transcurso de nuestra carrera y aplicarlos para establecer técnicamente si la medición de energía eléctrica se esta realizando adecuadamente.

En cuanto a las recomendaciones de posibles trabajos futuros, los autores consideran que es importante continuar con el análisis de la medición de energía y de ser posible tener un laboratorio que permita simular diferentes condiciones de funcionamiento del sistema eléctrico para establecer los efectos que tiene sobre la medición de energía eléctrica.

También se recomienda que las empresas distribuidoras de energía soliciten a los fabricantes de equipos de medición de energía eléctrica que incorporen otros parámetros para poder de esta forma estimar por ejemplo índices de calidad de energía eléctrica.

Finalmente, recomendamos que para efectos de transparencia en la medición de energía eléctrica se deben revisar los algoritmos utilizados en la medición de la potencia reactiva y que en la estimación de esta potencia se tengan en cuenta todos los factores que influyen en un dimensionamiento adicional del sistema. Adicionalmente, es necesario que siempre se realice la estimación de la potencia

trifásica utilizando la conexión que permite sensar las tres corrientes del sistema, ya que la conexión donde se sensan sólo dos corrientes (conexión Aron) sólo es adecuada en sistemas trifásicos equilibrados con carga balanceada y sin armónicos.

BIBLIOGRAFÍA

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. CÓDIGO DE REDES: Código de medida. Santa Fe de Bogotá: CREG, 1995. p. 133-141. : il. (CREG 025)

PETIT SUAREZ, Johann Farito y USTARIZ FARFAN, Armando Jaime. Análisis general de armónicos: revisión de las definiciones de potencia. Bucaramanga, 1997. 147 p. Tesis de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas.

ORDÓÑEZ PLATA, Gabriel *et al.* Propuesta de factores de penalización en regímenes no senoidales. I CIEEE, marzo, 2000; 6 p. ISSN 958-9318-69-X.

CZARNECKI, Leszek S. Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source. IEEE, Transactions on instrumentation and measurement, Vol. 37 No1, march, 1988.

Cox & Bayhzouz. A review of powers according to the IEEE Standard dictionary. IEEE, 1991.

MAKRAM, Elham B. *et al.* Effect of harmonic distortion in reactive power measurement. IEEE Transactions on industry applications, Vol 28, No 4, julio/agosto, 1992.

ABB METERING (USA). ALPHA METER: Medidor electrónico y analizador de servicio Alpha II. Santa Fe de Bogotá: ABB-COLTAVIRA, 1994. 47 P.

SIEMENS (USA). Medidor de estado sólido S4. Boletín 987, revisión 2. Charlotte: SIEMENS, 1997. 85 p.

ENTE NACIONAL REGULADOR DE LA ELCTRICIDAD (COLOMBIA).
Expediente 2659 del ENRE - Reclamo del cliente Acalú – Cta 20 1-0841-84. Santa
Fe de Bogota: Edenor, noviembre, 1996. 7 p.

CONGRESO REGIONAL DEL ÁREA ANDINA IEEE-ANDESCON99. Factores de discriminación
en regímenes no senoidales. Isla Margarita, 1999.

REVISTA MUNDO ELÉCTRICO COLOMBIANO. Armónicos: definiciones de la
potencia en regímenes no senoidales. Vol. 14 No 40. Julio-septiembre, 2000. p. 165-
167.

<<http://www.conenergia.com>>

<e-mail: información@instra.com.lt>

< e-mail: Nickson@oconee.sema.slb.com>

ANEXO A

MÉTODOS DE CONEXIÓN PARA TRANSFORMADORES DE MEDIDA

En los sistemas eléctricos trifásicos existen dos métodos convencionales para la conexión de transformadores de medida. Como muestra la figura 42, para esta conexión se requiere de tres PTs y tres CTs, donde los PTs obtienen el valor de tensión de fase para cada una de las tres fases. Lo mismo ocurre con los CTs, los cuales obtienen el valor de la corriente que circula por el conductor sentido. Este método se asemeja a estar interviniendo tres sistemas monofásicos, donde la potencia trifásica es la suma de las tres potencias obtenidas como lo expresa la siguiente ecuación:

$$S_{3\phi} = V_{RN} I_R + V_{SN} I_S + V_{TN} I_T$$

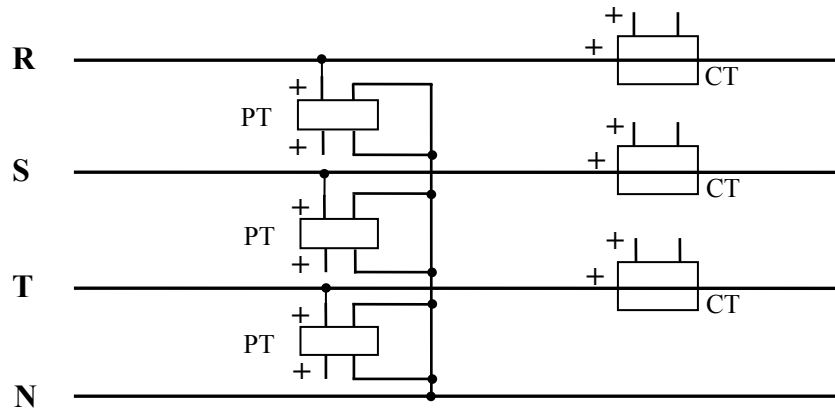


Fig. 42 Esquema de medición con 3 PTs y 3 CTs.

El segundo método utilizado para la conexión de transformadores de medida corresponde a la conexión Aron como se muestra en la figura 43. Esta conexión

requiere de dos PTs y dos CTs. Los PTs obtienen dos valores de tensión de línea, los cuales están referenciados a una misma fase y los CTs obtienen el valor de la corriente que circula por dos conductores, correspondientes a las fases sensadas en tensión.

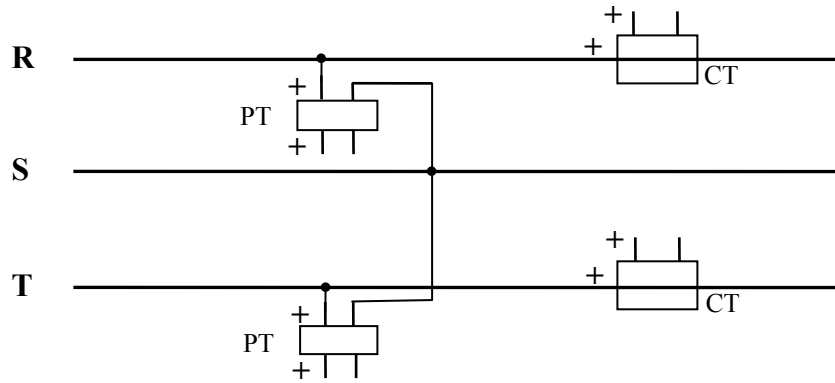


Fig. 43 Esquema de medición con 2 PTs y 2 CTs (Conexión Aron).

Los valores de potencias activa, reactiva y de dimensionamiento trifásicas son obtenidos a partir de las siguientes expresiones respectivamente:

$$P_{3\phi} = |\vec{V}_{AB}| \cdot |\vec{I}_A| \cos(\varphi) + |\vec{V}_{CB}| \cdot |\vec{I}_C| \cos(\varphi)$$

$$Q_{3\phi} = |\vec{V}_{AB}| \cdot |\vec{I}_A| \sin(\varphi) + |\vec{V}_{CB}| \cdot |\vec{I}_C| \sin(\varphi)$$

$$S_{3\phi} = |\vec{V}_{AB}| \cdot |\vec{I}_A| + |\vec{V}_{CB}| \cdot |\vec{I}_C|$$

En sistemas trifásicos de cuatro hilos no esta definida la forma más adecuada de obtener la potencia de dimensionamiento. Para sistemas trifásicos, el diccionario estándar IEEE establece dos definiciones para la obtención de la potencia de dimensionamiento y se presentan a continuación.

$$S_A = \sum_k S_k = \sum_k \sqrt{P_k^2 + Q_{F_k}^2} \quad k = R, S \text{ y } T$$

$$S_V = \sqrt{\left(\sum_k P_k\right)^2 + \left(\sum_k Q_{F_k}\right)^2}$$

ANEXO B

PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE ALGORITMOS DE MEDIDORES DIGITALES DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

A continuación se presenta el programa desarrollado para la simulación de los diferentes algoritmos de los medidores digitales de energía eléctrica instalados por la ESSA E.S.P utilizados en la estimación de potencias, teniendo en cuenta las características de las señales de tensión y corriente.

La plataforma sobre la cual se implemento este programa de simulación es MATLAB y su ejecución se realiza desde la ventana del “workspace”.

```
% PROGRAMA PARA LA SIMULACION DE LOS ALGORITMOS DE MEDICON DE
MEDIDORES DIGITALES Y DE ESTADO SÓLIDO.

% OSCAR QUINTERO FRIAS COD. 1982664
% EDWARD YESID GAMEZ LAMUS COD. 1984027

clear;
clc;
close
close
disp('PROGRAMA PARA LA SIMULACION DE LOS ALGORITMOS DE MEDICON DE
MEDIDORES DIGITALES Y DE ESTADO SÓLIDO.')
```



```
disp('UIS 2004')
disp('OSCAR QUINTERO FRIAS      COD. 1982664')
disp('EDWARD YESID GAMEZ LAMUS COD. 1984027')
```



```
pause
clc;
disp('*****VALORES DE TENSION DE LA SEÑAL FUNDAMENTAL*****')
disp('LOS SIGUIENTES VALORES DE TENSION DEBEN SER DADOS EN VOLTS Y
LOS ANGULOS EN GRADOS')
pause
```



```
% ingreso valores eficaces de tensión por fase

vrmsr=input('ingrese el valor eficaz de la tensión, fase(r):');
angrv(1,1)=input('ingrese el ángulo de la tensión,
fase(r):')*pi/180;
```

```

vrmsv=input('ingrese el valor eficaz de la tensión, fase(s):');
angsv(1,1)=input('ingrese el ángulo de la tensión,
fase(s):')*pi/180;
vrmsv=input('ingrese el valor eficaz de la tensión, fase(t):');
angtv(1,1)=input('ingrese el ángulo de la tensión,
fase(t):')*pi/180;

clc
disp('*****VALORES DE CORRIENTE DE LA SEÑAL FUNDAMENTAL*****')
disp('LOS SIGUIENTES VALORES DE CORRIENTE DEBEN SER DADOS EN AMPERES
Y LOS ANGULOS EN GRADOS')
pause

% ingreso valores eficaces de corriente por fase

irmsr=input('ingrese el valor eficaz de la corriente, fase(r):');
angri(1,1)=input('ingrese el ángulo de la corriente,
fase(r):')*pi/180;
irmsv=input('ingrese el valor eficaz de la corriente, fase(s):');
angsi(1,1)=input('ingrese el ángulo de la corriente,
fase(s):')*pi/180;
irmsv=input('ingrese el valor eficaz de la corriente, fase(t):');
angti(1,1)=input('ingrese el ángulo de la corriente,
fase(t):')*pi/180;

clc

% ingreso frecuencia fundamental

f1=input('ingrese el valor de la frecuencia fundamental (hz):');
clc;

disp('*****INGRESO DE DATOS POR ARMONICO*****')
disp('LAS MAGNITUDES DEBEN SER DADAS EN PORCENTAJES, TOMANDO COMO
BASE LOS VALORES CORRESPONDIENTES A LA')
disp('FRECUENCIA FUNDAMENTAL Y LOS ANGULOS EN GRADOS TOMANDO LA ONDA
DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL COMO REFERENCIA.')
disp('LOS VALORES POR ARMONICO DEBEN SER DADOS EN ORDEN CRECIENTE,
EMPEZANDO POR EL ARMONICO DE MENOR ORDEN Y')
disp('TERMINADO CON EL DE MAYOR. LOS VALORES CORRESPONDIENTES A LA
FRECUENCIA FUNDAMENTAL NO DEBEN SER INGRESADOS.')

pause

clc

disp('*****ONDA DE TENSION*****')
disp('*****FASE R*****')

% ingreso del número de armónicos en tensión

```

% vector de magnitudes en porcentaje de la tensión por armónico. En la posición (1,n) se guarda la magnitud en porcentaje del enésimo armónico.

```
frv=input('ingrese el orden del mayor armónico:');
```

% este valor es utilizado únicamente para un proceso interno del programa, no es tomado como una entrada o un valor ingresado.

```
clc
```

```
clc
```

```
disp('*****ONDA DE TENSION*****')
disp('*****FASE R*****')
```

```
a=1;
```

```
while a<frv
```

```
    a=input('ingrese el orden del armónico:');
```

```
    magrv(1,a)=input('ingrese su magnitud(%):')*vrmsr/100;
```

```
    angrv(1,a)=input('ingrese su ángulo(grados):')*pi/180;
```

```
end
```

```
magrv(1,1)=vrmsr;
```

```
clc
```

```
disp('*****ONDA DE TENSION*****')
disp('*****FASE S*****')
```

```
fsv=input('ingrese el orden del mayor armónico:');
```

```
clc
```

```
disp('*****ONDA DE TENSION*****')
disp('*****FASE S*****')
```

```
a=1;
```

```
while a<fsv
```

```
    a=input('ingrese el orden del armónico:');
```

```
    magsv(1,a)=input('ingrese su magnitud(%):')*vrmsr/100;
```

```
    angsv(1,a)=input('ingrese su ángulo(grados):')*pi/180;
```

```
end
```

```
magsv(1,1)=vrmsr;
```

```
clc
```

```
clc
```

```
disp('*****ONDA DE TENSION*****')
disp('*****FASE T*****')
```

```

ftv=input('ingrese el orden del mayor armónico:');

clc

disp('*****ONDA DE TENSION*****')
disp('*****FASE T*****')

a=1;

while a<ftv
    a=input('ingrese el orden del armónico:');
    magtv(1,a)=input('ingrese su magnitud(%):')*vrms/100;
    angtv(1,a)=input('ingrese su ángulo(grados):')*pi/180;
end
magtv(1,1)=vrms;

clc

disp('*****ONDA DE CORRIENTE*****')
disp('*****FASE R*****')

fri=input('ingrese el orden del mayor armónico:');

clc
clc

disp('*****ONDA DE CORRIENTE*****')
disp('*****FASE R*****')

a=1;

while a<fri
    a=input('ingrese el orden del armónico:');
    magri(1,a)=input('ingrese su magnitud(%):')*irmsr/100;
    angri(1,a)=input('ingrese su ángulo(grados):')*pi/180;
end
magri(1,1)=irmsr;

clc

disp('*****ONDA DE CORRIENTE*****')
disp('*****FASE S*****')

fsi=input('ingrese el orden del mayor armónico:');

clc

disp('*****ONDA DE CORRIENTE*****')
disp('*****FASE S*****')

a=1;

```

```

while a<fsi
    a=input('ingrese el orden del armónico:');
    magsi(1,a)=input('ingrese su magnitud(%):')*irmss/100;
    angsi(1,a)=input('ingrese su ángulo(grados):')*pi/180;
end
magsi(1,1)=irmss;

clc

disp('*****ONDA DE CORRIENTE*****')
disp('*****FASE T*****')

fti=input('ingrese el orden del mayor armónico:');

clc

disp('*****ONDA DE CORRIENTE*****')
disp('*****FASE T*****')

a=1;

while a<fti
    a=input('ingrese el orden del armónico:');
    magti(1,a)=input('ingrese su magnitud(%):')*irmst/100;
    angti(1,a)=input('ingrese su ángulo(grados):')*pi/180;
end
magti(1,1)=irmst;

clc

% construcción de las señales de tensión y corriente

syms t

% vectores de tensión y corriente temporales. Estos vectores serán
% utilizados para crear las señales finales.

% señales de tensión

for c=1:frv
    vtr(c)=sqrt(2)*magrv(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angrv(1,c));
    vtr90(c)=sqrt(2)*magrv(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angrv(1,c)-c*(pi/2));
end

for c=1:fsv
    vts(c)=sqrt(2)*magsv(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angsv(1,c));
    vts90(c)=sqrt(2)*magsv(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angsv(1,c)-c*(pi/2));
end

for c=1:ftv
    vtt(c)=sqrt(2)*magtv(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angtv(1,c));

```

```

        vtt90(c)=sqrt(2)*magtv(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angtv(1,c)-
c*(pi/2));
end

% señales de corriente
for c=1:fri
    itr(c)=sqrt(2)*magri(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angri(1,c));
    itr90(c)=sqrt(2)*magri(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angri(1,c)-c*(pi/2));
end

for c=1:fsi
    its(c)=sqrt(2)*magsi(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angsi(1,c));
    its90(c)=sqrt(2)*magsi(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angsi(1,c)-c*(pi/2));
end

for c=1:fti
    itt(c)=sqrt(2)*magti(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angti(1,c));
    itt90(c)=sqrt(2)*magti(1,c)*sin(2*f1*pi*c*t+angti(1,c)-c*(pi/2));
end

% sumatoria de los elementos de los vectores temporales, para formar
la señal final

% señales de tensión
vr=sum(vtr);
vs=sum(vts);
vt=sum(vtt);

% señales de tensión desfasadas 90
vr90=sum(vtr90);
vs90=sum(vts90);
vt90=sum(vtt90);

% señales de corriente
ir=sum(itr);
is=sum(its);
it=sum(itt);

disp('-----SEÑALES DE TENSION EN EL TIEMPO-----')
vr
vs
vt

% DISTORSION ARMONICA TOTAL DE TENSION

datrv=0;
for n=2:frv
    datrv=datrv+(magrv(1,n)^2);
end
disp('-----DISTORSION ARMONICA TOTAL DE TENSION-----')
```

```

disp('')
disp('*****FASE R*****')
DAT=(sqrt(datrv))/magrv(1,1)

datstv=0;
for n=2:fsv
    datstv=datstv+(magsv(1,n)^2);
end
disp('')
disp('*****FASE S*****')
DAT=(sqrt(datsv))/magsv(1,1)

dattv=0;
for n=2:ftv
    dattv=dattv+(magtv(1,n)^2);
end
disp('')
disp('*****FASE T*****')
DAT=(sqrt(dattv))/magtv(1,1)

% graficacion
a=1;
x=[0:0.0000997:0.03334];

for n=0:0.0001:0.03334
    b=a+1;
    a=b;
    vrgraf(1,a)=subs(vr,t,n);
    vsgraf(1,a)=subs(vs,t,n);
    vtgraf(1,a)=subs(vt,t,n);
end

figure(1)
hold on
title('SEÑALES DE TENSION')
xlabel('t')
ylabel('v')
plot(x,vrgraf,'y')
plot(x,vsgraf,'r')
plot(x,vtgraf,'b')
hold off
legend('fase r','fase s','fase t',-1);

pause

disp('-----SEÑALES DE CORRIENTE EN EL TIEMPO-----')
ir
is
it

```

```

% DISTORSION ARMONICA TOTAL DE CORRIENTE

dati=0;
for n=2:fri
    dati=dati+(magri(1,n)^2);
end
disp('-----DISTORSION ARMONICA TOTAL DE CORRIENTE-----')
disp('')
disp('*****FASE R*****')
DAT=(sqrt(dati))/magri(1,1)

datsi=0;
for n=2:fsi
    datsi=datsi+(magsi(1,n)^2);
end
disp('')
disp('*****FASE S*****')
DAT=(sqrt(datsi))/magsi(1,1)

datti=0;
for n=2:fti
    datti=datti+(magti(1,n)^2);
end
disp('')
disp('*****FASE T*****')
DAT=(sqrt(datti))/magti(1,1)

% graficación
a=1;

for n=0:0.0001:0.03334
    b=a+1;
    a=b;
    irgraf(1,a)=subs(ir,t,n);
    isgraf(1,a)=subs(is,t,n);
    itgraf(1,a)=subs(it,t,n);
end

figure(2)
hold on
title('SEÑALES DE CORRIENTE')
xlabel('t')
ylabel('v')
plot(x,irgraf,'y')
plot(x,isgraf,'r')
plot(x,itgraf,'b')
hold off
legend('fase r','fase s','fase t',-1);

pause
clc

```

```

% valores rms de tensión y corriente

vefr=sqrt(f1*int(vr^2,t,0,1/f1));
vefs=sqrt(f1*int(vs^2,t,0,1/f1));
veft=sqrt(f1*int(vt^2,t,0,1/f1));

iefr=sqrt(f1*int(ir^2,t,0,1/f1));
iefs=sqrt(f1*int(is^2,t,0,1/f1));
ieft=sqrt(f1*int(it^2,t,0,1/f1));

syms t

disp('*****ALGORITMOS DE MEDICION*****')
disp('Elija el medidor que desee, tecleando el numero
correspondiente a la marca y referencia deseada.')
disp('')
disp('1. ABB ref. Alpha II')
disp('2. SIEMENS ref. S4')
disp('3. EMH-ELGAMA ref. LZQM')
disp('4. SCHLUMBERGER ref. FULCRUM, QUANTUM y VECTRON')
disp('5. Todos los medidores.')
disp('')
disp('Estos valores estan dado en kW, kVARS y kVA, respectivamente')

a=input('Ingrese el numero correspondiente al contador que se desea
analizar:');

if a==1 | a==5

    clc
    disp('^^^^^^^^Algoritmo de medición ABB ref. Alpha II^^^^^^^^')

    %potencia de dimensionamiento
    sr1=vefr*iefr;
    ss1=vefs*iefs;
    st1=veft*ieft;

    % potencia activa
    pvir1=vr*ir;
    pvis1=vs*is;
    pvit1=vt*it;

    % potencia activa por fase
    pr1=f1*int(pvir1,t,0,1/f1);
    ps1=f1*int(pvis1,t,0,1/f1);
    pt1=f1*int(pvit1,t,0,1/f1);

    % potencia activa trifásica
    disp('=====POTENCIA ACTIVA TRIFÁSICA')
    p3=(pr1+ps1+pt1)/1000;
    P3=eval(p3)

```

```

% potencia reactiva por fase
qr1=sqrt((sr1^2)-pr1^2);
qs1=sqrt((ss1^2)-ps1^2);
qt1=sqrt((st1^2)-pt1^2);

disp('=====POTENCIA REACTIVA TRIFÁSICA')
q3=(qr1+qs1+qt1)/1000;
Q3=eval(q3)

disp('=====POTENCIA DE DIMENSIONAMIENTO TRIFASICA')
s3=(sr1+ss1+st1)/1000;
S3=eval(s3)

% cálculo del factor de potencia
fp=P3/S3;

disp('=====FACTOR DE POTENCIA=====')
fp

end

if a==2 | a==5

disp('^^^^^^^^Algoritmo de medición SIEMENS ref. S4^^^^^^^^')

% potencia activa
pvir2=vr*ir;
pvis2=vs*is;
pvit2=vt*it;

% potencia activa por fase
pr2=f1*int(pvir2,t,0,1/f1);
ps2=f1*int(pvis2,t,0,1/f1);
pt2=f1*int(pvit2,t,0,1/f1);

% potencia activa trifásica
disp('=====POTENCIA ACTIVA TRIFÁSICA')
p3=(pr2+ps2+pt2)/1000;
P3=eval(p3)

% potencia reactiva
qvir2=vr90*ir;
qvis2=vs90*is;
qvit2=vt90*it;

% potencia reactiva por fase
qr2=f1*int(qvir2,t,0,1/f1);
qs2=f1*int(qvis2,t,0,1/f1);
qt2=f1*int(qvit2,t,0,1/f1);

```

```

disp('=====POTENCIA REACTIVA TRIFÁSICA')
q3=(qr2+qs2+qt2)/1000;
Q3=eval(q3)

%potencia de dimensionamiento
sr2=vefr*iefr;
ss2=vefs*iefs;
st2=veft*ieft;

disp('=====POTENCIA DE DIMENSIONAMIENTO TRIFASICA')
s3=(sr2+ss2+st2)/1000;
S3=eval(s3)

% cálculo del factor de potencia
fp=P3/S3;

disp('=====FACTOR DE POTENCIA=====')
fp

end

if a==3 | a==5

disp('^^^^^^Algoritmo de medición EMH-ELGAMA ref. LZQM^^^^^^')

% potencia activa
pvir3=vr*ir;
pvis3=vs*is;
pvit3=vt*it;

% potencia activa por fase
pr3=f1*int(pvir3,t,0,1/f1);
ps3=f1*int(pvis3,t,0,1/f1);
pt3=f1*int(pvit3,t,0,1/f1);

% potencia activa trifásica

disp('=====POTENCIA ACTIVA TRIFÁSICA=====')
p3=(pr3+ps3+pt3)/1000;
P3=eval(p3)

% potencia reactiva
qvir3=vr90*ir;
qvis3=vs90*is;
qvit3=vt90*it;

% potencia reactiva por fase
qr3=f1*int(qvir3,t,0,1/f1);
qs3=f1*int(qvis3,t,0,1/f1);

```

```

qt3=f1*int(qvit3,t,0,1/f1);

disp('=====POTENCIA REACTIVA TRIFÁSICA')
q3=(qr3+qs3+qt3)/1000;
Q3=eval(q3)

%potencia de dimensionamiento
sr3=sqrt((pr3^2)+qr3^2);
ss3=sqrt((ps3^2)+qs3^2);
st3=sqrt((pt3^2)+qt3^2);

disp('=====POTENCIA DE DIMENSIONAMIENTO TRIFASICA')
s3=(sr3+ss3+st3)/1000;
S3=eval(s3)

% cálculo del factor de potencia
fp=cos(atan(Q3/P3));

disp('=====FACTOR DE POTENCIA=====')
fp

end

if a==4 | a==5
disp('^^^^^^Algoritmo de medición SCHLUMBERGER ref. FULCRUM,
QUANTUM y VECTRON^^^^^^')

% potencia activa
pvir4=vr*ir;
pvis4=vs*is;
pvit4=vt*it;

% potencia activa por fase
pr4=f1*int(pvir4,t,0,1/f1);
ps4=f1*int(pvis4,t,0,1/f1);
pt4=f1*int(pvit4,t,0,1/f1);

% potencia activa trifásica
disp('=====POTENCIA ACTIVA TRIFÁSICA')
p3=(pr4+ps4+pt4)/1000;
P3=eval(p3)

% potencia reactiva
qvir4=vr90*ir;
qvis4=vs90*is;
qvit4=vt90*it;

% potencia reactiva por fase

```

```

qr4=f1*int(qvir4,t,0,1/f1);
qs4=f1*int(qvis4,t,0,1/f1);
qt4=f1*int(qvit4,t,0,1/f1);

disp('=====POTENCIA REACTIVA TRIFÁSICA')
q3=(qr4+qs4+qt4)/1000;
Q3=eval(q3)

%potencia de dimensionamiento
sr4=sqrt((pr4^2)+qr4^2);
ss4=sqrt((ps4^2)+qs4^2);
st4=sqrt((pt4^2)+qt4^2);

disp('=====POTENCIA DE DIMENSIONAMIENTO TRIFASICA')
s3=(sr4+ss4+st4)/1000;
S3=eval(s3)

% cálculo del factor de potencia
fp=P3/S3;

disp('=====FACTOR DE POTENCIA=====' )
fp

end

```