



"Vigilada Mineducación"

PROTOTIPO DE ANALIZADOR DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
TRIFÁSICA UTILIZANDO ALMACENAMIENTO EN NUBE Y MONITOREO
REMOTO

WILSON FERNANDO GONZÁLEZ GALLEGO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

MANIZALES

2019

PROTOTIPO DE ANALIZADOR DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
TRIFÁSICA UTILIZANDO ALMACENAMIENTO EN NUBE Y MONITOREO
REMOTO

WILSON FERNANDO GONZÁLEZ GALLEGO

Proyecto de trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería

Director:

M.Sc. Rubén Darío Flórez Hurtado

Codirectora:

D. Diana Yomali Ospina López

Línea de Investigación: Instrumentación

Grupo de Investigación: Automática

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

MANIZALES

2019

RESUMEN

El ahorro y uso adecuado de la energía eléctrica es una demanda económica, social e incluso cultural hoy en día. La primera tarea para lograrlo consiste en la medición de los consumos actuales para saber, con datos concretos y reales, cuáles son las actividades, horas o máquinas que mayor influencia tienen en el desempeño energético de los hogares, edificios y fábricas. En el actual trabajo se presenta toda la secuencia de actividades que se fueron desarrollando para llegar, finalmente, al diseño e implementación de un dispositivo *hardware-software* que pudiera medir los consumos de energía eléctrica de cargas trifásicas hasta de 220 voltios y 100 amperios para la frecuencia fundamental de 60 Hz. Después de su implementación, el sistema se probó con cargas resistivas, inductivas y capacitivas y se comparó con equipos industriales arrojando errores de entre 1% y 2%, a veces inferiores. Con esto se ha dado un primer por parte de la institución que servirá de guía para trabajos futuros cuyo objetivo final sea tener un instrumento debidamente certificado.

Palabras clave: energía eléctrica trifásica, normatividad medidores eléctricos, almacenamiento en nube, diseño medidor de energía eléctrica.

ABSTRACT

Adequate use electric power is a economic, social and even cultural demand today. The first task to achieve this is to measure current consumption to know, with concrete and real data, what are the activities, hours or machines that the greatest influence on energy homes performance, buildings or factories. The actual work present the entire sequence of activities that were developed are shown, finally, to the design and implementation a hardware-software device that could measure the electric power consumption of three-phase loads up to 220 volts and 100 amps for the fundamental frequency of 60 Hz. After of its implementation, the prototype was probed with resistive, inductive and capacitive loads and its results was compared with industrial equipments delivering errors between 1% and 2%, sometimes less. With this instument the institution had a take one first step about energy measurements which will serve how to guide to continue to final objetic, a certificate device.

Key words: three phase electrical energy, electrical energy measurement, electronic instrumentation design.

TABLA DE CONTENIDO

1	PRESENTACIÓN.....	11
2	ANTECEDENTES.....	12
2.1	HARDWARE.....	12
2.2	SOFTWARE.....	13
3	ÁREA PROBLEMÁTICA Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	16
3.1	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA.....	16
3.2	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	17
4	JUSTIFICACIÓN.....	18
5	REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL.....	20
5.1	NORMA ISO 50001.....	20
5.2	NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS (NTC).....	21
5.3	NORMAS INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC).....	25
6	REFERENTE TEÓRICO.....	26
6.1	INTRODUCCIÓN.....	26
6.2	BUILDING ENERGY MANAGMENT SYSTEM (BEMS).....	26
6.3	VARIABLES ELÉCTRICAS INVOLUCRADAS.....	28
6.3.1	<i>Corriente Y Voltaje</i>	28
6.3.2	<i>Potencia</i>	33
7	OBJETIVOS.....	36
7.1	OBJETIVO GENERAL.....	36
7.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	36
8	METODOLOGÍA.....	37
8.1	TRANSDUCTOR.....	37
8.1.1	<i>Sensor</i>	38
8.1.2	<i>Acondicionamiento De La Señal</i>	39
8.2	ELEMENTOS DE CONVERSIÓN.....	39
8.3	MANIPULACIÓN DE LOS DATOS.....	39

8.4	TRANSMISIÓN DE DATOS.....	40
8.5	VISUALIZACIÓN DE DATOS.....	40
8.6	PIRÁMIDE DE LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL.....	41
9	RESULTADOS	42
9.1	TRANSDUCTOR.....	43
9.1.1	<i>Captura De Datos.....</i>	43
9.1.2	<i>Sensores de Corriente.....</i>	43
9.1.3	<i>Sensores de Voltaje.....</i>	44
9.1.4	<i>Adecuación De La Señal.....</i>	45
9.1.5	<i>Pre – Adecuación.....</i>	45
9.1.6	<i>Pre – Adecuación Señal de Corriente.....</i>	45
9.1.7	<i>Pre – Adecuación señal de voltaje.....</i>	46
9.1.8	<i>Filtrado.....</i>	47
9.1.9	<i>Filtrado de la Señal de Corriente.....</i>	48
9.1.10	<i>Filtrado de la Señal de Voltaje.....</i>	48
9.1.11	<i>Post - Adecuación.....</i>	48
9.2	ELEMENTOS DE CONVERSIÓN.....	51
9.3	MANIPULACIÓN DE DATOS EN BAJO NIVEL	52
9.4	TRANSMISIÓN DE DATOS.....	52
9.5	INTERFAZ GRÁFICA CON DATOS EN NUBE	53
9.6	PIRÁMIDE DE LA AUTOMATIZACIÓN	53
9.7	VERIFICACIÓN	54
9.8	PRUEBAS	60
10	CONCLUSIONES	64
11	RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	66
12	REFERENCIAS.....	68

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Normativa de medidores de energía en Colombia.-----	21
Tabla 2 Corrientes y voltajes en las cargas básicas -----	29
Tabla 3 Cargas usadas en la verificación del instrumento-----	60

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Arquitectura para análisis de datos vía internet.....	14
Figura 2 Aporte de cada combustible en generación de energía eléctrica en el mundo en el año 2013	16
Figura 3 Modelo de sistema de gestión energética.....	20
Figura 4 Partes constitutivas de un BEMS.....	28
Figura 5 Aplicación de motores en EU.....	30
Figura 6 Circuito RL con alimentación senoidal.....	31
Figura 7 Señal senoidal con desfase δ	31
Figura 8 Formas de onda de voltaje y corriente para una carga RL.....	33
Figura 9 Etapas del Sistema Generalizado de Medidas.....	37
Figura 10 Etapas internas de un transductor.....	38
Figura 11 Etapas en el desarrollo del prototipo.....	40
Figura 12 Pirámide la automatización industrial para el proyecto.....	41
Figura 13 Diagrama de bloques del dispositivo hardware.....	42
Figura 14 Sensor de corriente alterna SCT 013 – 000.....	43
Figura 15 Transformadores reductores de voltaje.....	44
Figura 16 Circuito acondicionador de corriente.....	46
Figura 17 Circuito acondicionador de voltaje.....	47
Figura 18 Circuito de niveles de referencias de voltaje.....	49
Figura 19 Diagrama de bloques del conversor ADS1256.....	50
Figura 20 Conversor ADC de 8 canales.....	51
Figura 21 Tarjeta electrónica desarrollada.....	54
Figura 22 Datos de las potencias almacenados en la nube por el equipo de medición.....	55
Figura 23 Datos de las corrientes y voltaje almacenados en la nube por el equipo de medición.....	56
Figura 24 Datos de las potencias descargadas de la nube.....	57
Figura 25 Datos de corrientes y voltaje descargados de la nube.....	57
Figura 26 Ventana del software donde se muestran los consumos de energía y valores estadísticos ...	59
Figura 27 Comparación entre corrientes instrumento proyecto (azul) e instrumento patrón (rojo).....	61
Figura 28 Errores porcentuales entre los datos del instrumeto desarrollado y el de referencia.....	62
Figura 29 Comparación entre voltajes del instrumento proyecto (azul) y el instrumento patrón (rojo)	63

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Abreviatura	Término
IDE	Índice de Desempeño Energético
SGE	Sistema de Gestión Energética
NTC	Norma Técnica Colombiana
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
Var	VoltaAmperios reactivos
RTC	<i>Real Time Clock</i>

1 PRESENTACIÓN

El contenido del presente documento expone el proceso llevado a cabo para el diseño y desarrollo de un prototipo para la medición de energía eléctrica trifásica. Inicialmente, en el capítulo 2, se realiza un recorrido por otros dispositivos similares ya sea en la parte de *software* o en la parte de *hardware* o, en menor medida, en ambas; posteriormente, en el capítulo 3, se expondrá un panorama global acerca de la problemática en el consumo actual de la energía eléctrica para, a partir de allí, justificar, en el capítulo 4, el diseño del dispositivo desarrollado. También, muy importante, en el capítulo 6 se hace un repaso de las ecuaciones utilizadas en el cálculo del consumo de energía eléctrica y de la normatividad asociada a los dispositivos encargados de estas mediciones, esta normatividad ha merecido un capítulo aparte, el capítulo 5, debido a su extensión e importancia. Finalmente, se muestra el proceso de diseño e implementación del prototipo, sus resultados, con el análisis correspondiente, y las respectivas conclusiones, entre las cuales, se puede adelantar, que para el alcance que se propuso, el dispositivo funcionó satisfactoriamente para la medida de energía trifásica en su componente fundamental de 60 Hz y con el cual se abren muchas posibilidades de trabajo futuro.

2 ANTECEDENTES

El mercado actual ofrece variedad de dispositivos que permiten monitorear el consumo de energía eléctrica trifásica, sin embargo, dichos dispositivos, presentan algunas desventajas [1], tales como, en el caso colombiano, dificultad en despachos internacionales, elevados costos (US\$7,200- \$13,200) [2] [3], pobre visualización de gráficas [4] y falta de almacenamiento *offline* [5]; pero sobre todo, son sistemas, que por ser productos de investigaciones privadas, son cerrados, es decir son desconocidos el diseño electrónico empleado y el manejo de la información, en cuanto a su *hardware* y *software*, cabe destacar, sin embargo, que son instrumentos que cumplen con los estándares internacionales que requieren estas medidas y que se mencionarán en el capítulo cinco.

En el sector industrial se encuentran sistemas de registro, normalmente ofrecidos por los proveedores de energía pero fundamentalmente encaminados al consumo de la energía reactiva.

Existen diversos proyectos de investigación, que se mencionarán más adelante, enfocados en la gestión y control de cargas en el lado del consumidor que, para el año 2013, constituían el 32% del consumo de la energía total mundial, hablando de edificios solamente [6], sin embargo se aprecia ausencia de investigaciones en lo referente al diseño de instrumentos de medición que permitan realizar esta gestión. Los antecedentes se han dividido en dos grandes grupos, desarrollos en *hardware* o *hardware-software* y desarrollo en *software* (mayoría). Esta división surgió producto de la investigación de antecedentes que se hizo, en la cual se evidenció que hay abundancia de artículos en el tema de tratamiento de los datos (*software*), no siendo igual en el tema de desarrollo de *hardware*, que, como se había adelantado en la presentación, no es un tema abiertamente discutido por ser, muchas veces, producto de investigaciones privadas de las empresas.

2.1 HARDWARE

En [7] se diseñó un sistema *hardware-software* para monitoreo de consumos puntuales en máquinas industriales haciendo un comparativo entre el consumo de energía y el proceso que se realiza en el mismo instante con el ánimo de establecer relaciones que

pueden derivar en acciones para la optimización energética de la máquina en cuestión. Siguiendo con la tendencia de dispositivos de este tipo integrados a Internet, en [8] los autores diseñaron e implementaron una herramienta para monitoreo de energía eléctrica utilizando tecnologías de *hardware* para la adquisición y de *software* en nube para el tratamiento y visualización de la información. Por medio de un sistema *hardware-software*, los autores en [9], diseñaron un sistema de monitoreo, en tiempo real, usando un analizador comercial *Merlin Gerin*, y desarrollaron una herramienta gráfica en *Delphi* para su visualización. Con esta herramienta gráfica, los autores se propusieron cambiar la visualización numérica del equipo comercial, en una visualización gráfica, más amigable y que permita observar tendencias de una manera más ágil, además de guardar información en una base de datos.

2.2 SOFTWARE

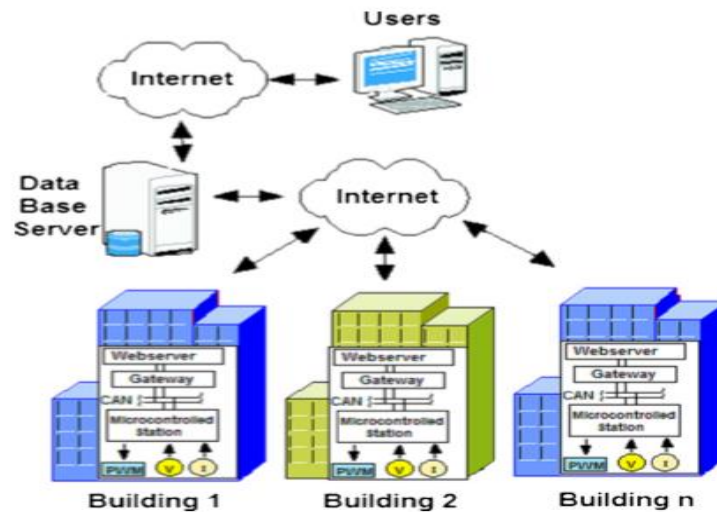
Para el caso de investigaciones en el área de *software* se tiene el trabajo denominado *Global Model Based Anticipative Building Energy Management System (GMBA-BEMS)* [6] en el cual se realiza un análisis de desempeño de gestión de cargas utilizado para optimizar el compromiso entre confort y ahorro de energía. Para la validación de este modelo, los autores crearon diferentes cargas tales como lavadora, calentadores, refrigerador, etc. utilizando el simulador SIMBAD perteneciente a la herramienta MatLab/Simulink. En sus simulaciones y comparando con un predictor de precios los autores lograron establecer que se podía ahorrar un 1% diarios del costo de la energía eléctrica.

En temas relacionados con aplicaciones algorítmicas, en [10] se hace una revisión detallada de propuestas para el manejo adecuado de la energía en lo que se conoce como Casa Inteligente, algunos integrando energías renovables y otros no.

Relacionado con sistemas integrados se tiene en [11] un diseño y construcción de un sistema integrado (*hardware-software*) de ahorro inteligente que se probó en un edificio de supermercados. Se utilizó un sistema DDE (*Dynamic Data Exchange*) para la comunicación con el *hardware* y se desarrolló una aplicación de *software* para el control

inteligente de las cargas, especialmente de aire acondicionado. Siguiendo esta línea de *hardware-software*, en [12] se usó un sistema de monitoreo multidimensional como

Figura 1 Arquitectura para análisis de datos vía internet.



Fuente: [13]

elemento de soporte para diversas estrategias de control. Así mismo, en [13] se propone un método basado en el monitoreo continuo de diferentes variables operacionales tales como datos de consumo de energía y temperaturas durante prolongados lapsos de tiempo. Este historial, que es almacenado en la nube, facilita el análisis y adecuado diseño de estrategias de control. Particularmente los autores proponen un diseño basado en balance de energía. Además utilizan herramientas de MatLab en *internet* para el almacenamiento y posterior análisis de datos y se confrontó con un sistema real de aire acondicionado. En la Figura 1 se puede apreciar un diagrama ilustrativo de este método.

En [14] se utiliza análisis *PCA* (*Principal Components Analysis*) y *MPCA* (*Multilinear Principal Components Analysis*) para el monitoreo estadístico y multivariado de edificios ilustrando un caso de estudio para demostrar los beneficios de estos métodos en el manejo e interpretación de los datos de consumo.

Se puede concluir, que existen más investigaciones en lo que se refiere al análisis de los datos arrojados por los instrumentos de medida, que en el diseño propio del instrumento, pues en los proyectos investigados [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14],

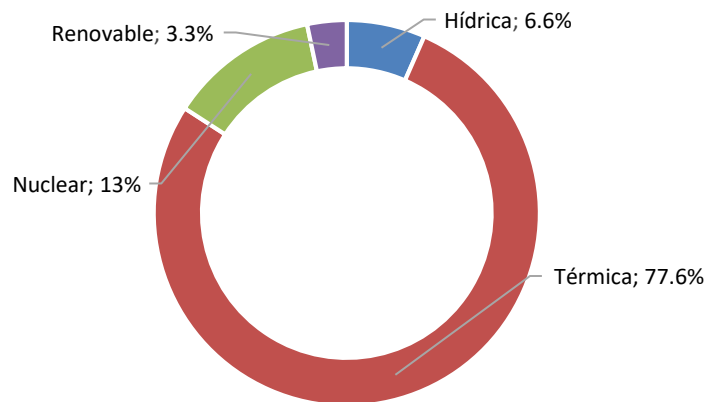
que realizan monitoreo en línea la mayoría usa medidores comerciales, lo cual reafirma la importancia del presente proyecto con miras a entregar a la comunidad académica un diseño que permita dar un primer paso en la implementación de un dispositivo final que cumpla con todos los estándares internacionales de medición.

3 ÁREA PROBLEMÁTICA Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA

El crecimiento poblacional mundial y su necesidad cada vez mayor de energía ha llevado al incremento de las emisiones de contaminantes y se ha convertido en una preocupación tanto gubernamental como del sector privado. Aunque la energía eléctrica, puede ser generada a partir de diversas fuentes, son la energía térmica (líquidos, gases, biomasa y desechos), y la energía hídrica las que más se emplean, llegando a proporcionar según la *International Atomic Energy Agency*, en el año 2013, casi el 84% del total consumido en el mundo [15]. En la Figura 2. se puede apreciar la contribución de estas dos fuentes de energía, y de otras de menor proporción, en el consumo eléctrico mundial. Estas dos fuentes de generación de energía eléctrica, térmica e hídrica, tienen inconvenientes. En la primera, la térmica, el impacto ambiental producido es alto debido a la quema de combustibles fósiles y su consecuente emisión de gases de efecto invernadero. Se han establecido límites en la generación de estos gases con el objeto de disminuir el impacto en el calentamiento global, por ejemplo en la comunidad europea se ha fijado una reducción

Figura 2 Aporte de cada combustible en la generación de energía eléctrica en el mundo en el año 2013



Fuente [15]

del 20% en la generación de estos gases [12]. En el segundo caso, la hídrica, se corre el riesgo de que cuando hayan sequías se sufra un desabastecimiento por falta de agua.

Con el ánimo de minimizar estos inconvenientes, constantemente se buscan nuevas maneras para encontrar otros medios de generación de energía (solar, viento, etc.) y para hacer uso eficiente de la energía.

Dentro de la segunda de estas alternativas, el uso eficiente de la energía, una parte fundamental consiste en la medición, almacenamiento y visualización del consumo eléctrico. La propuesta de este proyecto se centra en esta importante etapa mediante el diseño e implementación de un prototipo que consta de: 1) un sistema electrónico *hardware-software* de bajo nivel para la medición, 2) técnicas de computación en nube para el almacenamiento de datos, y 3) un software para la visualización de los parámetros eléctricos capturados por el sistema electrónico y almacenados en la nube. Este prototipo servirá para la determinación del consumo de energía eléctrica, proporcionando, además, mediante este diseño e implementación, un modelo de un sistema *hardware – software* que podrá ser utilizado por la comunidad académica en general para fines de monitoreo del consumo de energía eléctrica.

3.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo se puede implementar un dispositivo analizador de consumo de energía eléctrica trifásica con elementos de fácil adquisición y bajo costo que permita: 1) acceder a los datos mediante técnicas de computación con nube, 2) realizar un monitoreo y registro constante de las diferentes variables involucradas y 3) generar alertas para los usuarios?

4 JUSTIFICACIÓN

La quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad es una fuente importante de gases de efecto invernadero. El manejo eficiente de este tipo de energía, aumentando el rendimiento de los equipos eléctricos e instalando dispositivos que provean un ahorro energético, es una necesidad vital para la reducción en el consumo. Los edificios son los mayores consumidores de energía en el mundo [16]. Garantizar unas condiciones climáticas y espaciales que permitan vivir y trabajar cómodamente requiere un gran consumo de energía eléctrica y tiene un enorme impacto sobre el medio ambiente ya que también son generadores de residuos contaminantes atmosféricos. Debido a lo anterior y al aumento poblacional, los diseñadores de edificios se enfrentan al reto de proyectar edificaciones que sean confortables y que a la vez reduzcan al mínimo el impacto ambiental.

Aparte de la eficiencia energética exigida en las modernas construcciones, también se debe observar el hecho que muchas edificaciones antiguas no tenían previsto sistemas eficientes para minimizar el consumo eléctrico.

En este contexto, se han empezado a diseñar campañas orientadas a disminuir el consumo energético proporcionando un triple beneficio: primero, reducción en los costos de operación de las centrales generadoras, con lo que se puede atender a más personas con la misma capacidad de generación instalada; segundo, disminución de emisión de gases de efecto invernadero y tercero, disminución en el pago de energía eléctrica por parte de los consumidores. En otras palabras se busca hacer más con lo mismo lo cual es posible con la implementación de estrategias inteligentes de administración y mejor aprovechamiento de los insumos energéticos.

Por otra parte, se tiene la idea de que los problemas eléctricos tienen su origen en la empresa generadora. Sin embargo, es claro que un conocimiento inmediato acerca del consumo de la energía les proveería a los usuarios una herramienta con la cual podrían hacer un uso más eficiente de la misma, obteniendo ventajas tales como: analizar alternativas para racionalizar la energía, corregir el factor de potencia conociendo los

kilovoltamperios reactivos (kVAr) consumidos, identificar aquellas cargas que contribuyen en mayor medida al consumo de energía, determinar la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica en una instalación comercial o residencial, calcular índices energéticos y compararlos con los niveles recomendados, distribuir costos (facturación interna), detectar problemas relacionados con regulación y desbalance de voltaje, determinar el estado de los bancos de capacitores, establecer el nivel de carga de transformadores y alimentadores, entre otros [17].

La primera tarea en cualquier sistema que suponga una mejora, es la medición de las variables involucradas, pues con esto se logran identificar las fuentes de consumo ineficientes para su posterior corrección [12]. Concretamente, en el caso eléctrico, se debe comenzar con las variables básicas involucradas en el consumo de la energía eléctrica y estas son: el voltaje, la corriente y el ángulo de fase. Aunque existen equipos que ya realizan esta labor, tienen las desventajas de que sus costos son altos y, que al ser equipos comerciales, son de tecnologías cerradas, es decir, no se conoce específicamente cómo es su funcionamiento eléctrico ni el manejo de datos, debido a patentes e investigaciones internas de cada empresa, lo que hace más difícil su estudio por parte de la comunidad académica.

Con esta primera aproximación se pretende poner en conocimiento de la comunidad académica un prototipo de analizador de consumo que realice un monitoreo continuo con visualización de datos almacenados en la nube, con elementos fácilmente asequibles y sobre todo con una tecnología de *hardware* y *software* totalmente abierta. Un sistema de monitoreo como éste es de vital importancia ya que según [12] es posible: 1) tomar lecturas instantáneas que permitan identificar cargas de alto consumo, 2) registrar un consumo histórico con el cual se puedan realizar comparaciones que permitan crear límites mínimos y máximos y 3) analizar estos registros para buscar tendencias y patrones.

5 REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL

5.1 NORMA ISO 50001

La norma ISO 50001 [18] es un referente obligado a la hora de hablar sobre sistemas de gestión energética. Establece mecanismos para saber qué tan acertadamente se están manejando los Sistemas de Gestión Energética (SGE) al interior de una organización. No se trata de una norma comparativa entre organizaciones sino de una comparación entre las políticas propias de cada empresa y su correspondiente cumplimiento al interior de la misma mediante la revisión de indicadores de desempeño energético (IDE). En la Figura 3 se puede observar el esquema que presenta la norma ISO 50001 como modelo de un SGE.

Figura 3 Modelo de sistema de gestión energética.



Fuente [18]

Concretamente, para el desarrollo del presente trabajo, en su apartado (a) de la sección 4.4.3 Revisión energética, según [18] establece que:

“La organización debe desarrollar, registrar y mantener una revisión energética. La metodología y criterios utilizados para desarrollar la revisión energética deben ser documentados. Para desarrollar la revisión energética, la organización debe:

- a. Analizar el uso y consumo de energía en base a la medición y otros datos, es decir:
 - Identificar las fuentes actuales de energía;
 - Evaluar el uso y consumo de energía pasado y presente;”

5.2 NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS (NTC)

Existen una serie de normas según la NTC que aplican a medidores de energía eléctrica con sus respectivas consideraciones y aplicaciones. En la Tabla 1 se encuentran las principales normas establecidas por Icontec a través de la NTC relacionadas con la presente investigación.

Tabla 1 Normativa de medidores de energía en Colombia.

Norma	Año	Concepto	Aplicación
NTC 5019 [19]	2007	Establecer las características adecuadas de los equipos utilizados para medición de energía eléctrica (medidores, transformadores para instrumentos de medida, equipos auxiliares de medida, etc.). Las características de estos equipos están definidas en función de las características propias de la	Las características de los equipos de medida a las cuales se refiere esta norma son: medidores de energía, transformadores de tensión, y transformadores de corriente.

Norma	Año	Concepto	Aplicación
		instalación eléctrica en el punto de conexión y de las características propias de la carga a medir.	
NTC 5226 [20]	2003	Esta norma cubre los ensayos tipo para equipos de medición de energía eléctrica para aplicaciones interiores y exteriores y aplica a equipos nuevos destinados a la medición de la energía eléctrica en circuitos con frecuencia de 50 Hz o 60 Hz con tensión hasta de 600 V.	Medidores electromecánicos o estáticos para aplicaciones interiores y exteriores compuestos de uno o más elementos de medición, y uno o más registradores.
NTC 2147 [21]	2003	Esta es una norma para los ensayos tipo de medidores de energía eléctrica. cubre los requisitos particulares para medidores que están siendo utilizados para aplicaciones interiores.	Esta norma establece diferencia entre: medidores clase de exactitud 0,2 S y 0,5S; medidores clase de protección I y II; y medidores para usar en circuitos equipados con o sin neutralizadores de falla a tierra. Los niveles de ensayos requeridos son considerados como los valores mínimos para garantizar el funcionamiento apropiado del medidor bajo condiciones normales de trabajo.

Norma	Año	Concepto	Aplicación
NTC 2148 [22]	1989	Esta norma hace referencia a la electrotecnia y medidores de energía reactiva, la cual aplica a medidores tipo inducción de nueva fabricación.	La presente norma se aplica únicamente a los medidores tipo inducción de nueva fabricación para la medida de energía reactiva, con frecuencia entre 40 Hz y 60 Hz, precisión clase 3,0, para uso común y sus ensayos tipo.
NTC 2288 [23]	2003	Esta es una norma para los ensayos tipo de medidores de energía eléctrica. Cubre los requisitos particulares para medidores que están siendo utilizados para aplicaciones interiores y exteriores en grandes cantidades alrededor del mundo.	Esta norma establece diferencia entre: (1) Medidores clase de exactitud 0,5, 1 y 2. (2) Medidores clase de protección I y II; (3) Medidores para usar en circuitos equipados con o sin neutralizadores de falla a tierra.
NTC 4052 [24]	2003	Esta norma tiene aplicación en equipos de medición de energía eléctrica, presenta requisitos particulares. Además de la aplicación en medidores estáticos de energía activa (Clases 1 y 2).	Esta norma aplica solamente a medidores estáticos nuevos de clase de exactitud 1 y 2, destinados a la medición de la energía eléctrica activa de corriente alterna en circuitos con frecuencia de 50 Hz o 60 Hz y aplica solamente para sus ensayos tipo. Aplica sólo a medidores estáticos para aplicaciones interiores y

Norma	Año	Concepto	Aplicación
			exteriores compuestos de uno o más elementos de medida, y uno o más registradores incorporados en la misma caja. También aplica a indicadores de operación y salidas de prueba.
NTC 4569 [25]	2003	Esta norma tiene aplicación en equipos de medición de energía eléctrica, presenta requisitos particulares. Además de la aplicación en medidores estáticos de energía reactiva (Clases 2 y 3).	Esta norma aplica solamente a medidores estáticos nuevos de clase de exactitud 2 y 3, destinados a la medición de la energía eléctrica reactiva de corriente alterna, en circuitos con frecuencia de 50 Hz o 60 Hz y aplica solamente para sus ensayos tipo.
NTC 4856 [26]	2006	Esta norma ha sido elaborada con el fin de establecer los ensayos de rutina que se deben realizar a los medidores de energía para propósitos de verificación inicial; así como, para propósitos de verificación posterior de los medidores en funcionamiento.	Aplica únicamente para ensayos de rutina. No aplica para ensayos tipo ni para ensayos de aceptación de lotes. Aplica al conjunto del medidor y accesorios, incluyendo transformadores de corriente incorporados dentro de la caja del medidor.

Fuente: [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26]

5.3 NORMAS DE LA INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC)

En cuanto a normatividad internacional, la IEC 62053 del año 2003 establece la normativa aplicable a nueva fabricación de contadores estáticos de vatios-hora, de clases de precisión 0,2 s y 0,5 s, para la medición de corriente alterna de energía eléctrica activa en 50 Hz a 60 Hz. Aplica únicamente a los contadores estáticos de vatios - hora de transformadores que funcionan para el uso de interior que consiste en un elemento de medición y registro encerrados juntos en una misma caja de medición.

6 REFERENTE TEÓRICO

6.1 INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es de vital importancia para el desarrollo de las actividades industriales, comerciales y sociales. Se estima que el consumo mundial de energía eléctrica utilizada por edificios, tanto residenciales como corporativos, se acerca al 42% [27], lo que implica que la eficiencia en el uso de ella sea un factor clave que las empresas generadoras revisan constantemente en búsqueda de su optimización, sin comprometer el confort de las personas. Aunque las edificaciones modernas tienen sistemas inteligentes de manejo energético, los hábitos de los consumidores no pueden ser previstos con facilidad, además, todavía perduran muchas edificaciones que, debido a su antigüedad, no tenían previsto sistemas inteligentes de consumo y ahorro energético. Durante la última década se han desarrollado sistemas eficientes en el uso de la energía eléctrica en edificios que permiten analizar datos de consumo y tratan de prever los patrones de comportamiento de los usuarios [28]. Estos sistemas están compuestos tanto de dispositivos físicos (*hardware*) como de tecnologías de la información (*software*). Los sistemas de *hardware* no sólo miden variables eléctricas sino también algunas ambientales como temperatura, humedad, etc. En cuanto a los sistemas informáticos, existe una amplia variedad desde algoritmos de media básica hasta sistemas de inteligencia artificial [10]. Considerando la importancia y actualidad de estos sistemas de eficiencia energética y que como primera etapa de cada uno de ellos se encuentra la adquisición de datos, para su posterior evaluación, en el desarrollo del presente trabajo diseñó y construyó un prototipo de analizador de energía eléctrica trifásica de bajo costo con monitoreo constante, registro y visualización mediante técnicas informáticas en la nube (*IoT*).

6.2 BUILDING ENERGY MANAGEMENT SYSTEM (BEMS)

Los sistemas de control y ahorro de energía en edificios son conocidos como *BEMS* (*Building Energy Management System*). Un *BEMS* está conformado por cinco partes bien diferenciadas: adquisición de señales (eléctricas, ambientales), obtención de datos externos (precios de la energía, clima), interfaz de usuario, actuadores (interruptores, válvulas,

dampers) y optimizador. Estas cinco partes y sus relaciones pueden ser apreciadas en la Figura 4.

La primera parte, relacionada con la adquisición de señales, se encarga de leer las variables eléctricas y algunas ambientales que puedan influir en el consumo energético de un edificio tales como voltajes, corrientes, temperatura, humedad, calidad del aire, niveles de ruido, etc. Para ello se utilizan diferentes tipos de sensores de acuerdo a la variable y a los rangos de valores que se manejen en cada caso.

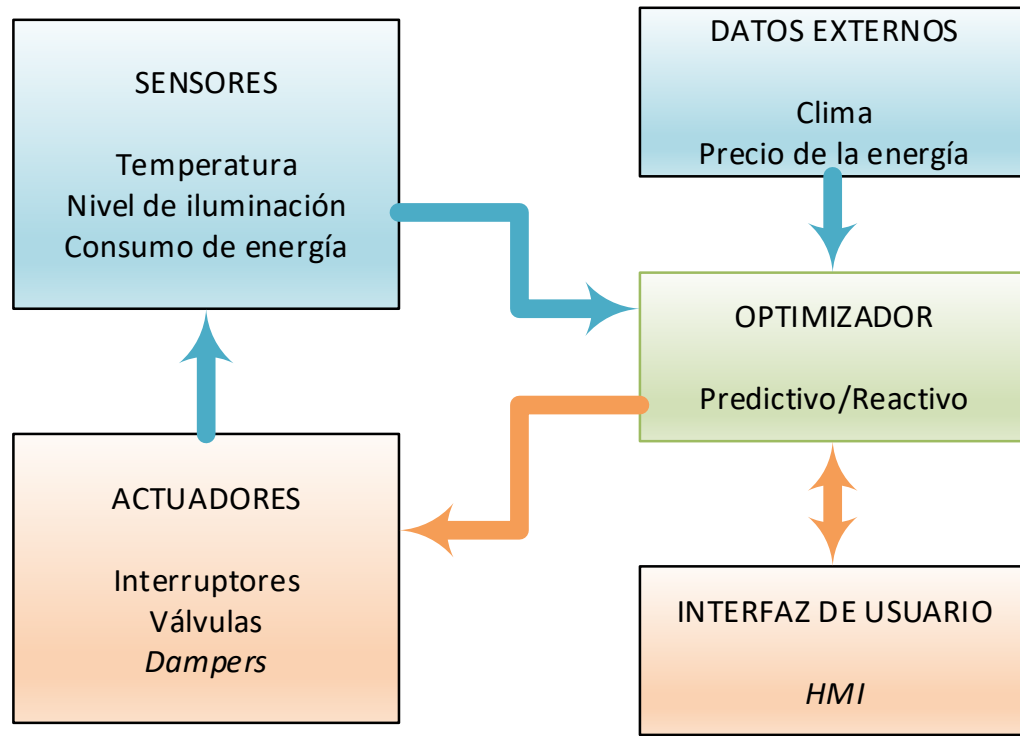
La segunda parte es la obtención de los datos externos que sean de interés tales como el precio de la energía en el mercado, horarios de trabajo del edificio en cuestión, cantidad de personas que ocupan el edificio, número de pisos, vegetación y otros que el investigador estime necesarios para su análisis energético [29].

La tercera es la Interfaz de usuario, un *BEMS* deberá estar en constante comunicación con los usuarios tanto para enviarles información acerca del consumo como para recibir consignas por parte de éstos.

Como cuarta parte están los actuadores, que son los elementos que conforman la etapa final del sistema y los encargados de ejercer el control directo sobre las cargas eléctricas que se necesitan manipular. Los actuadores pueden ser interruptores y válvulas.

Para finalizar esta el optimizador, es el cerebro del sistema, encargado de recibir las señales de los sensores, aplicar un algoritmo de control y entregar las órdenes correspondientes a los actuadores.

Figura 4 Partes constitutivas de un BEMS.



Adaptado de [13]

6.3 VARIABLES ELÉCTRICAS INVOLUCRADAS

6.3.1 Corriente Y Voltaje

La energía eléctrica que entregan las centrales generadoras tiene forma senoidal alterna y es denominada comúnmente como corriente alterna (CA). La principal razón para este tipo de generación radica en la facilidad con la cual se pueden elevar y reducir los niveles de tensión en corriente alterna en comparación con lo que supondría hacerlo en tensión continua, conocida comúnmente corriente directa (CD), y con lo cual se reducen pérdidas en el transporte.

Luego de su generación y transporte esta energía eléctrica senoidal alterna (CA) queda a disposición de todos los usuarios para que sea utilizada en la conexión de los diferentes equipos y necesidades del sector residencial, comercial, hospitalario e industrial. A estos equipos se les conoce, en términos generales, como cargas. Existen tres tipos de cargas: resistiva (R), inductiva (L) y capacitiva (C) y sus combinaciones RL, RC y RLC. Toda carga que se conecta a la red eléctrica estará incluida en alguno de estos seis tipos.

Cada vez que se conecta una carga al sistema de energía eléctrica senoidal comienza a circular por ella una corriente cuyo comportamiento depende del tipo de carga que se haya conectado. La Tabla 2 presenta las ecuaciones correspondientes para cada una de las tres cargas básicas: resistiva (R), inductiva (L) y capacitiva (C).

Tabla 2 Corrientes y voltajes en las cargas básicas

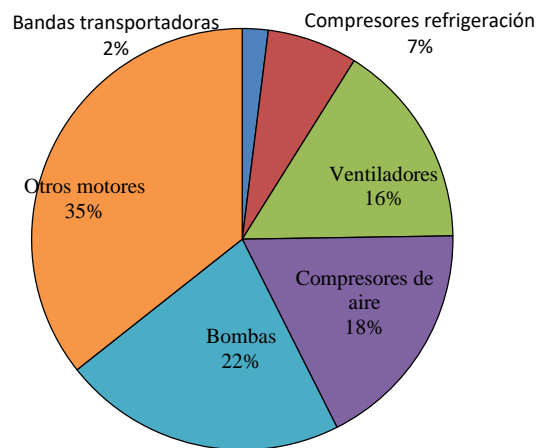
Tipo de carga	Corrientes	Voltajes
Resistencia (R)	$i_R = \frac{v}{R}$	$v_R = Ri$
Inductancia (L)	$i_L = \frac{1}{L} \int v dt$	$v_L = L \frac{di}{dt}$
Capacitancia (C)	$i_C = C \frac{dv}{dt}$	$v_C = \frac{1}{C} \int idt$

Fuente: [30]

Es de especial importancia la carga RL (combinación de una carga resistiva, R, y una inductiva, L) debido a que un motor eléctrico constituye una carga de este tipo y su uso cada vez es mayor, reemplazando, incluso, algunos equipos que antes funcionaban con vapor y gas [31]. Sus aplicaciones son muy amplias ya sea en el sector industrial, en el

comercio o en el sector hospitalario. Las estadísticas muestran que 2/3 de la energía consumida en una industria proviene del uso de motores [32]. La Figura 5 presenta algunos usos en la industria estadounidense clasificados según la aplicación que se hace del mismo. Se destaca su amplio uso en bombas y compresores, sumando ambos, el 40% del total de aplicaciones.

Figura 5 Aplicación de motores en EU.

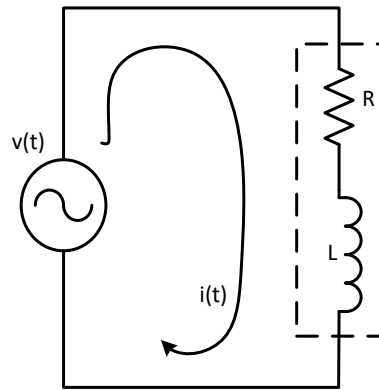


Adaptado de [32]

La Figura 6 presenta el circuito eléctrico de una carga RL alimentada por una fuente de tensión senoidal cuya expresión es dada por la ecuación (1):

$$v(t) = V_m \text{sen}(wt + \delta) \quad (1)$$

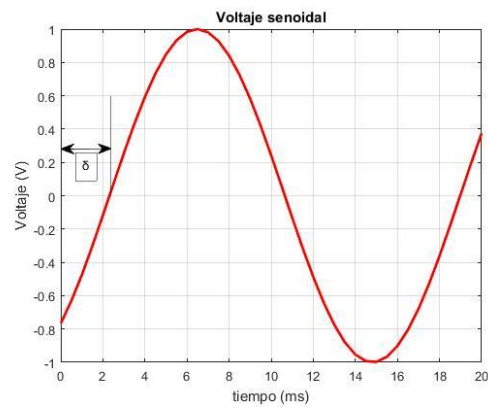
Figura 6 Circuito RL con alimentación senoidal



Fuente: Autor

Una forma de onda típica de este tipo se muestra en la Figura 7 con un ángulo de desfase δ .

Figura 7 Señal senoidal con desfase δ



Fuente: Autor

El comportamiento de la corriente viene dada por la malla del circuito de la Figura 6 y las ecuaciones básicas de la Tabla 2, obteniendo la ecuación (2):

$$v(t) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Reemplazando la ecuación (1) en la ecuación (2), dividiendo entre L y reorganizando términos se obtiene la ecuación (3) diferencial:

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = \frac{V_m}{L} \text{sen}(wt + \delta) \quad (3)$$

Que tiene como solución la ecuación (4):

$$i(t) = A (R \text{sen}(wt + \delta) - wL \text{cos}(wt + \delta)) - C \quad (4)$$

Con

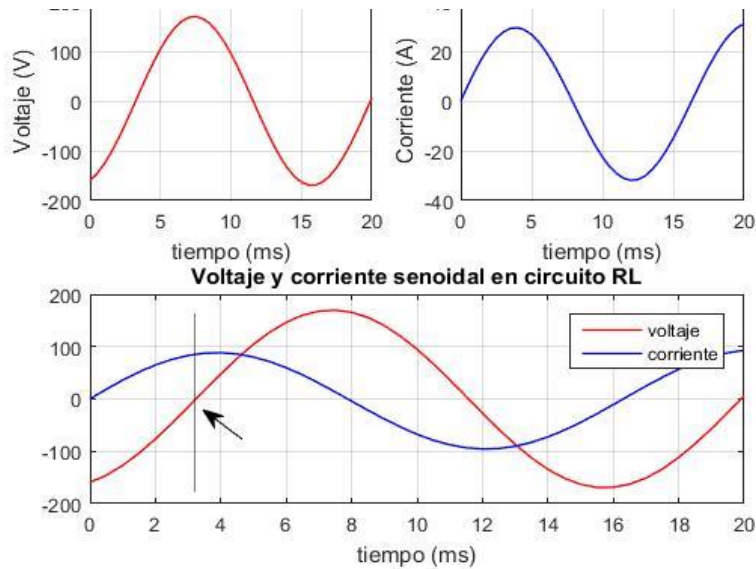
$$A = \frac{V_m}{R^2 + (wL)^2}$$

y

$$C = A(R \text{sen}\delta - wL \text{cos}\delta) e^{-\frac{R}{L}t}$$

Al graficar la tensión y la corriente sobre el mismo eje temporal, según se muestra en la Figura 8, se observa una diferencia de fase entre estas dos señales que se conoce como ángulo de fase v-i, por convenio se toma el voltaje como referencia [30], este desfase se presenta porque las inductancias almacenan energía en forma de campo magnético cada vez que una corriente eléctrica circula a través suyo. En la Figura 8 se presenta, de forma individual, el voltaje, la corriente y finalmente ambas señales juntas para poder apreciar el desfase (marcado con flecha). Se amplificó la señal de corriente en un factor de tres para mejorar la visualización.

Figura 8 Formas de onda de voltaje y corriente para una carga RL



Fuente: Autor

6.3.2 Potencia

Como se mencionó anteriormente, una carga RL es del tipo que representa a un motor eléctrico. Este tipo de carga consume dos clases de potencia, que es el producto instantáneo de la corriente y el voltaje. La potencia activa que es la que efectivamente utiliza para los diferentes movimientos mecánicos que el motor impulsa. Esta clase de potencia también es conocida como potencia real y habitualmente se designa con la letra P. El otro tipo de potencia es la potencia reactiva y es la que requiere el motor para su magnetización, sin la cual éste no funcionaría. Esta potencia se transfiere al motor de manera momentánea para su operación y luego éste la regresa a la fuente. Esto sucede cada ciclo de la señal alterna. Se suele designar con la letra Q. Aunque ambas son potencias, se utilizan dos nombres diferentes de unidades para diferenciarlas. En el caso de la potencia activa se usan los vatios (W) y para la potencia reactiva los volta-amperios (VA). De todas formas, a la central generadora le corresponde entregar a cada motor potencia para su circuito de magnetización y potencia para el realizar el trabajo mecánico correspondiente.

En otras palabras, potencia activa y reactiva. A la “suma” de estas dos potencias, o sea a la potencia total, se le conoce como potencia aparente o S . Se llama aparente porque la potencia reactiva realmente no produce trabajo mecánico sino que se usa para magnetizar al motor.

Debido a que ambas potencias son tratadas, matemáticamente, como dos vectores, existe un ángulo de diferencia entre ambas. Este ángulo es conocido como ϕ (phi) y el coseno de éste como factor de potencia. En motores, este valor del coseno suele estar entre 0,7 y 0,9. Con el aumento de motores en una instalación eléctrica también crece la potencia reactiva requerida. Para mantener la calidad en el servicio, las centrales generadoras han impuesto límites acerca del requerimiento de potencia reactiva por parte de las empresas. Si se sobrepasa el límite establecido, las empresas incurrirán en multas. Por este motivo es común que en cada industria existan bancos de condensadores, los cuales generan potencia reactiva y ayudan a aumentar el factor de potencia y por ende la disminución en el pedido que de esta clase de potencia se le requiera a la central generadora. Para la compensación de potencia, los condensadores suelen conectarse en paralelo con los motores. Sin embargo, tampoco es recomendable tener grandes bancos de condensadores puesto que un exceso de compensación podría provocar autoexcitaciones de los motores. Por regla, se suele realizar una compensación no superior a la intensidad en vacío de los motores [33].

Para el cálculo de las potencias instantánea, aparente, activa y reactiva y el factor de potencia, se emplean las ecuaciones (5), (6), (7), (8) y (9) [34]:

Potencia instantánea:

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (5)$$

Potencia aparente:

$$S = v_{rms}i_{rms} \quad (6)$$

Potencia activa:

$$P = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t=t_1}^{t_2} v(t)i(t)dt \quad (7)$$

Potencia reactiva:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (8)$$

Factor de potencia:

$$FP = \frac{|P|}{S} \quad (9)$$

Con,

v(t): voltaje instantáneo,

i(t): corriente instantánea

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t=t_1}^{t_2} v(t)dt}$$

$$i_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t=t_1}^{t_2} i(t)^2 dt}$$

7 OBJETIVOS

7.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo de analizador de consumo de energía eléctrica trifásica de bajo costo con análisis de potencia y energía usando almacenamiento en nube para realizar un monitoreo y registro constante de las diferentes variables mediante almacenamiento de datos en nube computacional y visualización por medio de una aplicación computacional gráfica.

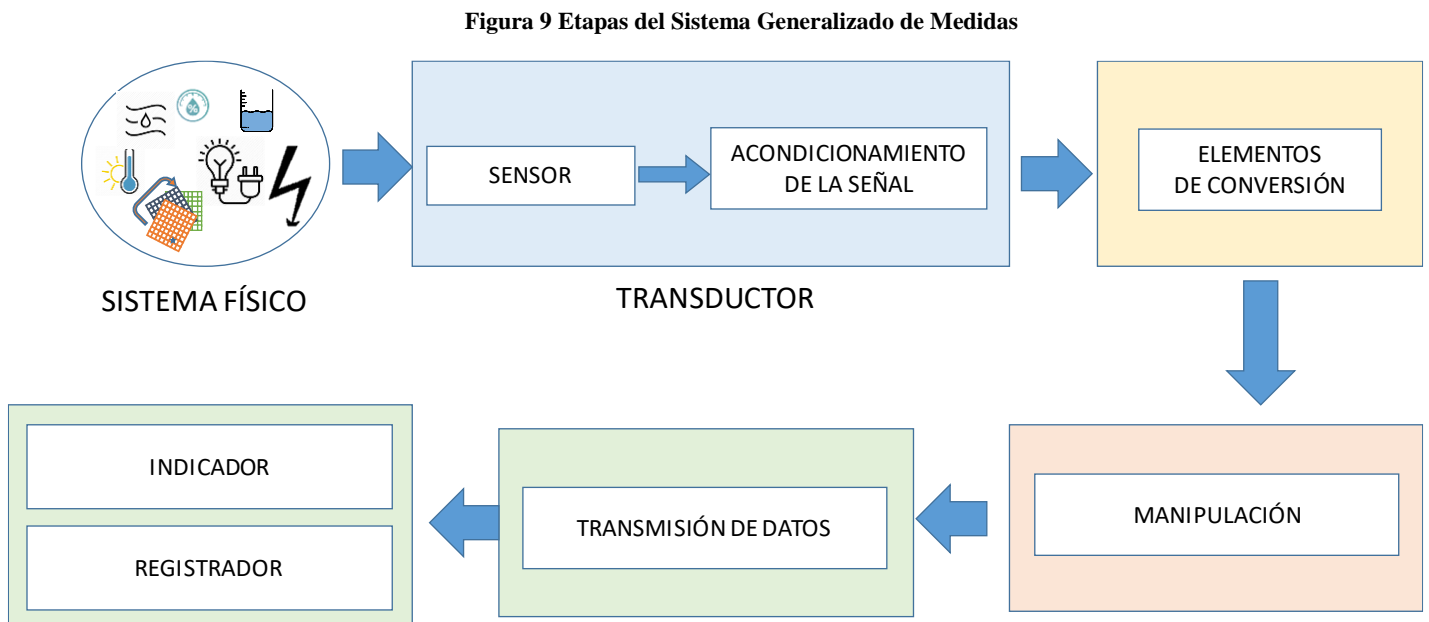
7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar un dispositivo electrónico que permita medir y calcular las variables eléctricas involucradas en el análisis de potencia y energía y enviar estos datos a la nube.
2. Crear un sistema de almacenamiento en la nube que permita guardar los datos suministrados diariamente por el sistema electrónico.
3. Desarrollar una herramienta computacional para el cálculo y visualización gráfica de los consumos diarios de potencia y energía activa y reactiva y que pueda, además, generar medidas estadísticas de tendencia central.

8 METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos del presente desarrollo tecnológico se siguieron dos metodologías, ambas complementarias. La primera metodología está basada en el sistema generalizado de medida [35] y la segunda en la pirámide de la automatización industrial.

El sistema generalizado de medida consiste de una serie de etapas que se deben ir cumpliendo desde la medición primaria del sistema físico hasta la entrega y visualización de los datos al usuario. Con base en esta metodología, el proceso que se siguió para el desarrollo del presente dispositivo se muestra en la Figura 9



Fuente: [35]

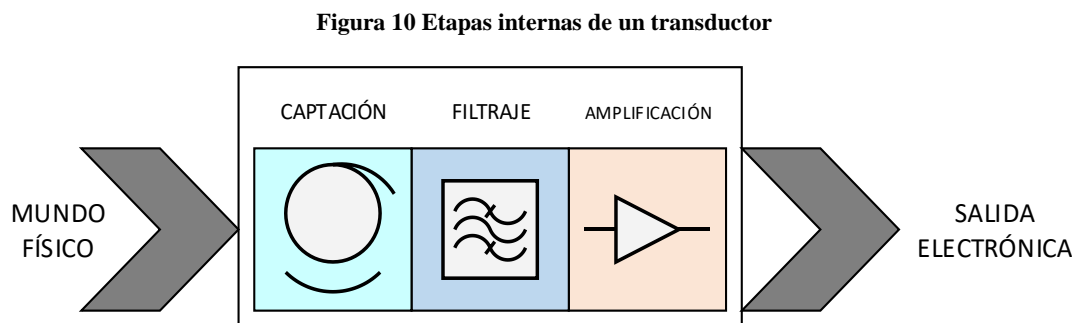
8.1 TRANSDUCTOR

Un transductor, en un sentido general, hace referencia a un sistema que es capaz de convertir un tipo de energía en otro. Este concepto es tan amplio que en él pueden caber

dispositivos tales como motores y cilindros. En instrumentación se usa una definición de transductor más específica:

“Un transductor es un dispositivo capaz de convertir el valor de una magnitud física en una señal eléctrica codificada, ya sea en forma analógica o digital” [36].

En el interior del transductor existirán dos componentes, los sensores y los circuitos de adecuación de la señal. Los sensores son los encargados de captar las señales del mundo físico pero sus salidas son, generalmente, de muy bajos voltajes y corrientes. Requieren, por tanto, unos circuitos adicionales que permitan depurar las señales de los captadores, normalmente contaminadas con ruidos electrónicos, y elevar estos valores a niveles manejables por toda la electrónica subsiguiente que se encargará de la manipulación de los datos. En la Figura 10 se aprecia un diagrama de bloques de esta situación.



Fuente: [36]

8.1.1 Sensor

Es el elemento primario de medida que está en contacto con la variable que se ha de medir. Ejemplos de estas variables pueden ser temperatura, humedad, flujo, etc. En el presente proyecto, las variables primarias son voltaje y corriente. Este elemento es el encargado de captar el estado o valor de la variable de proceso y producir una salida eléctrica que refleje estas condiciones. La definición aceptada de sensor es:

“elemento de un sistema de medida directamente afectado por la acción del fenómeno, cuerpo o sustancia portador de la magnitud a medir [37]”.

8.1.2 Acondicionamiento De La Señal

Luego de capturada la información de las variables de interés y convertida en una señal eléctrica, debe pasar por un proceso en el cual se eliminen ruidos eléctricos y se modifiquen sus niveles de potencia para que puedan continuar su proceso hacia sistemas electrónicos de conversiones y manipulaciones de datos. Estos procesos de acondicionamiento pueden ser lineales o no lineales e incluyen ampliaciones, atenuaciones, derivadas, integrales, adiciones, modulaciones, filtrados, rectificaciones, entre otras.

8.2 ELEMENTOS DE CONVERSIÓN

Después de pasar por los elementos primarios de captación de las variables y por el sistema de adecuación electrónica, las salidas están en forma de señales eléctricas tales como voltajes, corrientes, frecuencias, etc. Sin embargo, puede suceder, que para los sistemas encargados de la manipulación de datos, este formato no sea adecuado y deba ser modificado. Ejemplo de ello podría ser que la señal eléctrica esté en forma analógica y la manipulación de los datos se haga de manera digital, por tanto, se requerirá un circuito adicional que convierta las señales analógicas en señales digitales.

8.3 MANIPULACIÓN DE LOS DATOS

Una vez la información captada por los sensores esté debidamente filtrada, en los niveles adecuados de tensión y corriente y en el formato eléctrico requerido por la electrónica diseñada, se puede proceder a la respectiva manipulación de los datos. Esta manipulación es muy variada y depende exclusivamente de lo que se busca con el dispositivo. Dichas manipulaciones pueden incluir muestreos, sumatorias, promedios, almacenamientos temporales o permanentes de datos, algoritmos para determinación de máximos y mínimos, cruces por cero, aplicación de fórmulas específicas para obtención de indicadores numéricos, etc.

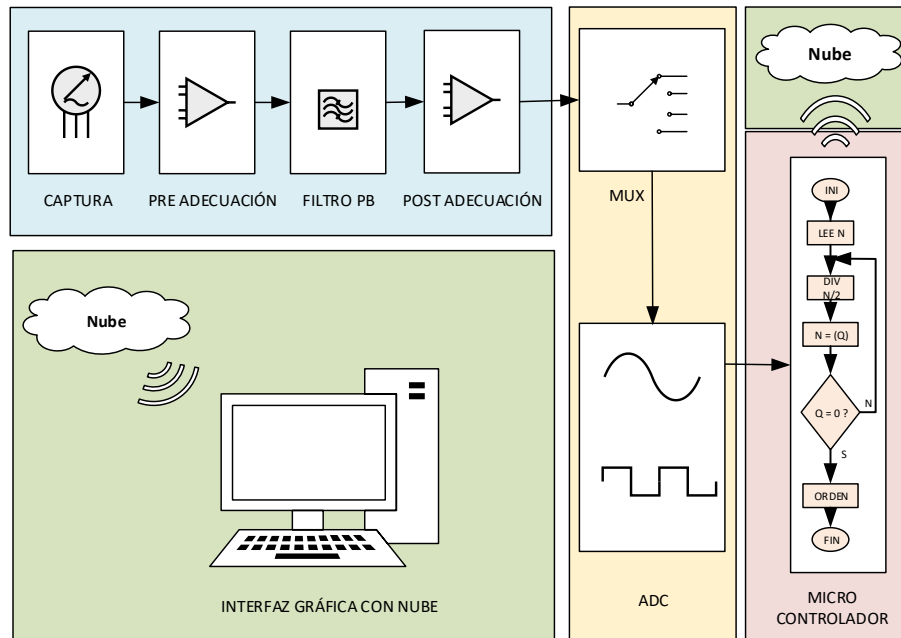
8.4 TRANSMISIÓN DE DATOS

En la actualidad es frecuente que los sistemas electrónicos de adquisición, adecuación y manipulación de las señales se haga en el punto de interés donde se encuentran las variables que deben ser medidas, pero que su almacenamiento o visualización se encuentre en otro lugar del edificio, o incluso en otra ciudad. Se requiere entonces que el sistema electrónico esté en capacidad de transmitir estos datos por diferentes medios ya sean cableados, como redes de datos o inalámbricos como sistemas satelitales, bluetooth, wifi, etc.

8.5 VISUALIZACIÓN DE DATOS

Finalmente, los datos procedentes de todo el sistema de extracción y transmisión deben ser mostrados a los usuarios interesados, para fines de monitoreo, control, almacenamiento de históricos, análisis de tendencias, etc. Esta visualización puede ser numérica, por ejemplo en un *display*, o mediante gráficas, por ejemplo en computador o

Figura 11 Etapas en el desarrollo del prototipo



Fuente: Autor

celular. Muchos de estos sistemas de visualización también ofrecen opciones para el cálculo de algunos datos de interés como máximos, comparación contra niveles de umbral (*thresholds*).

Todas las etapas que se han mencionado se muestran, en forma de diagrama de bloques, en la Figura 11.

8.6 PIRÁMIDE DE LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

Las etapas antes mencionadas están presentes en el modelo de la pirámide de la automatización industrial se muestran en la Figura 12.

Figura 12 Pirámide la automatización industrial para el proyecto



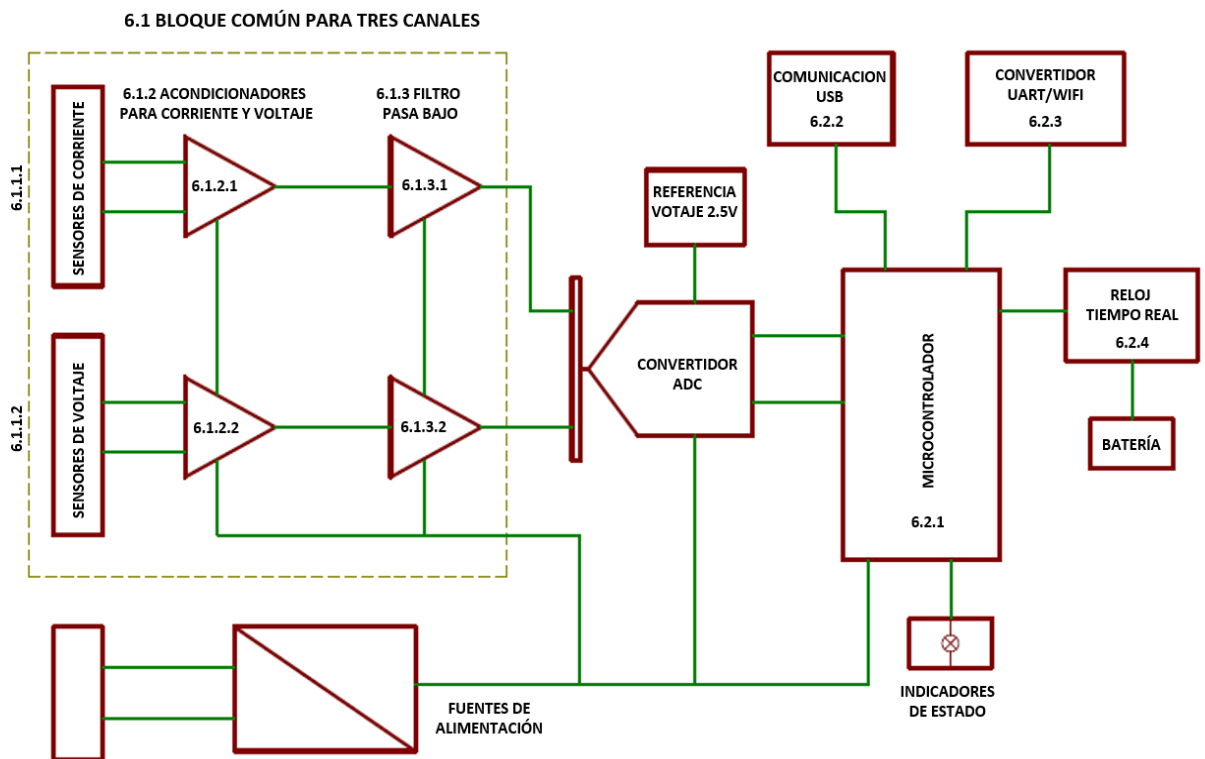
Fuente: Autor

Comenzando en la parte inferior de la pirámide se tienen: el nivel de componentes (sensores, interruptores, relés, motores, válvulas), nivel de dispositivos de control (contadores, temporizadores, controladores de eventos), nivel de procesos (controladores lógicos, sistemas de supervisión) y finalmente nivel de planta (planeación y control de aplicaciones).

9 RESULTADOS

Siguiendo la metodología presentada en la sección anterior, se procedió con el correspondiente desarrollo tecnológico, teniendo en cuenta cada una de las etapas mencionadas y abarcando con ellas los objetivos propuestos en el proyecto. En la Figura 13. se puede apreciar el diagrama de bloques del dispositivo implementado, en cuanto a su parte de *hardware*, con toda la interconectividad de los subsistemas electrónicos cuyo propósito es adquirir, acondicionar, filtrar y digitalizar las señales obtenidas de los sensores; con dicho proceso las señales se encuentran en condiciones para ser ingresadas al microcontrolador y continuar con los cálculos. En el interior del microcontrolador se desarrolló el programa de adquisición, almacenamiento temporal, operaciones de cálculo para el ángulo de fase y posterior envío a la nube, además de otras funciones auxiliares,

Figura 13 Diagrama de bloques del dispositivo hardware



Fuente: Autor

todo esto mediante software de bajo nivel (*Low level software*). En la última etapa del proyecto se desarrolló una interfaz gráfica con datos en nube (*HMI programation*), mediante un programa en lenguaje de alto nivel para tomar los datos almacenados en la nube, mostrar las gráficas correspondientes y algunas variables estadísticas, cumpliendo de esta manera con todos los objetivos propuestos.

9.1 TRANSDUCTOR

9.1.1 Captura De Datos

Es la primera tarea que se debe ejecutar y consiste, básicamente, en leer los datos de corriente y voltaje de cada una de las líneas trifásicas. Para ello se utilizaron sensores comerciales de bajo costo y fácil adquisición y conexión para estar en correspondencia con el objetivo del proyecto.

En esta etapa se adquirieron las señales de tensión y corriente, provenientes del sistema trifásico, a continuación, se explican detalladamente los sensores empleados en cada caso.

9.1.2 Sensores de Corriente

Debido a que se trabajó con niveles de tensión de 220VAC, se decidió utilizar sensores no invasivos que evitaran la desconexión de las líneas para su ubicación y

Figura 14 Sensor de corriente alterna SCT 013 – 000



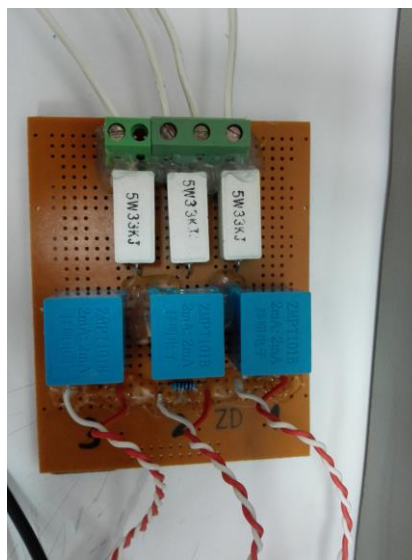
Fuente: Autor

minimizar, de esta manera, el riesgo eléctrico. Para realizar la medida de corriente se empleó un transformador de corriente a voltaje. Cumpliendo con los requisitos de bajo costo, fácil adquisición y método no invasivo, el sensor seleccionado fue uno de la serie SCT-013. Este sensor es de tipo transformador y, por inducción electromagnética, entrega una señal de salida senoidal, requisito básico para el diseño de *hardware*; es conocido como transformador de corriente (CT). La relación de vueltas entre primario y secundario es variable dependiendo del modelo. Para este diseño se optó por el modelo 000 el cual entrega una señal de salida senoidal con un rango de salida entre 0 y 50 mA para una señal de entrada entre 0 y 100 amperios. En la Figura 14 se presenta este sensor y se ha hecho notar su núcleo partido, característica que lo hace no invasivo, ya que se conecta alrededor del cable conductor.

9.1.3 Sensores de Voltaje

Como sensores de voltaje se han seleccionado transformadores reductores de tensión, o transformadores de potencial (PT) monofásicos, uno para cada canal o línea trifásica, que conviertan la señal de 220 VAC en una señal de aproximadamente 1 VAC para que pueda ser conectada al *hardware* de medición. Este transformador es de baja

Figura 15 Transformadores reductores de voltaje



Fuente: Autor

potencia de salida, de aproximadamente 1W, ya que el instrumento de medida solo requiere una muestra de tensión y tiene una impedancia de entrada muy alta, además, de esta forma, se protege la integridad de los componentes electrónicos de la tarjeta, pues estando la señal senoidal muestreada entre +1VAC y -1VAC puede soportar picos hasta de un 300%, esto es, señales entre +3VAC y -3VAC. En la Figura 15 se aprecian los tres transformadores seleccionados, uno por fase.

9.1.4 Adecuación De La Señal

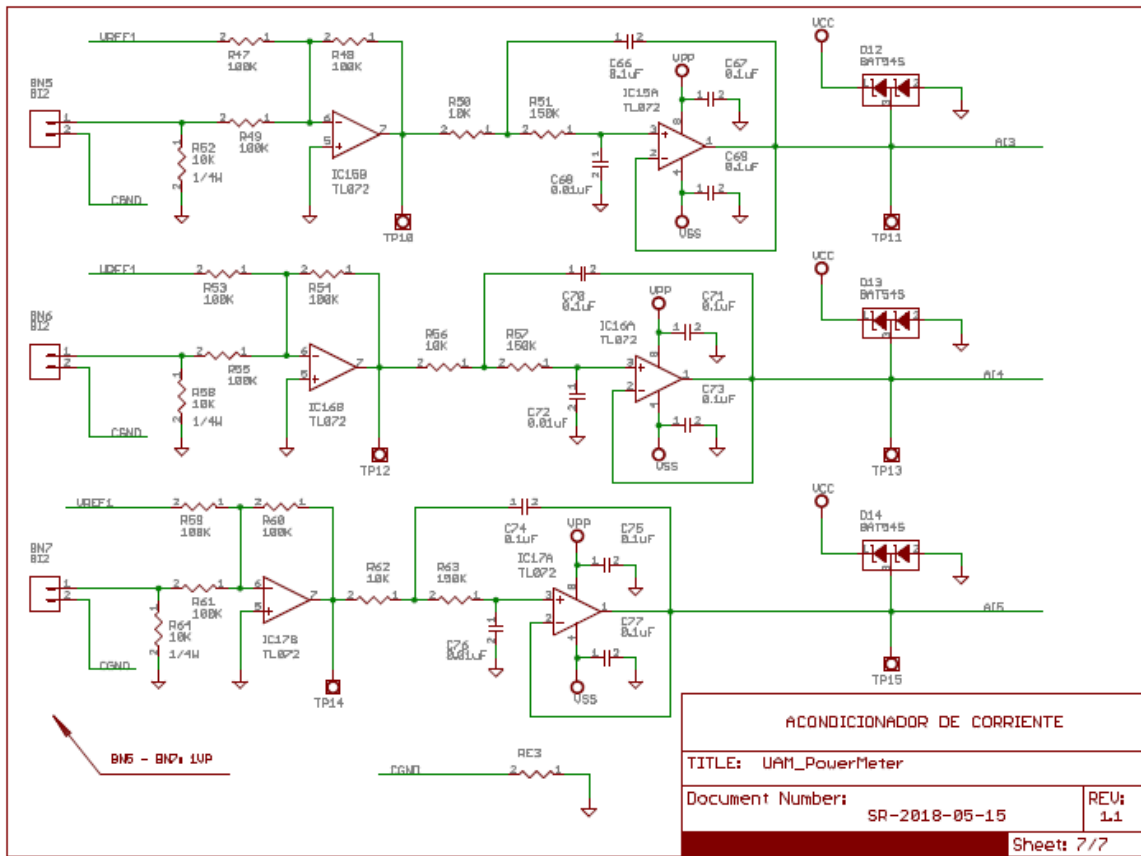
9.1.5 Pre – Adecuación

Posterior a la adquisición de las señales de voltaje y corriente se realizaron ajustes con el fin de adecuar amplitudes y compensar *offsets* de las señales para poderlas filtrar de manera adecuada, fue necesario realizar el proceso por separado de cada una de las entradas ya que éstas presentan diferencias en la información que contienen, es por ello que cada una de las señales presenta una etapa de adecuación, implementadas con amplificadores en diferentes configuraciones.

9.1.6 Pre – Adecuación Señal de Corriente

En la Figura 16 se puede evidenciar la etapa de pre- adecuación de la señal de corriente, la cual consta de un circuito amplificador para regular niveles de tensión, la señal proveniente del sensor ingresa por el terminal inversor del amplificador operacional y la salida se conecta posteriormente a una etapa de filtrado, cual se detallará en la sección 9.1.2.2; esta etapa se implementó con el circuito integrado TL072. El procedimiento de amplificación se realizó por separado a cada una de las señales provenientes de las tres líneas del sistema trifásico.

Figura 16 Circuito acondicionador de corriente

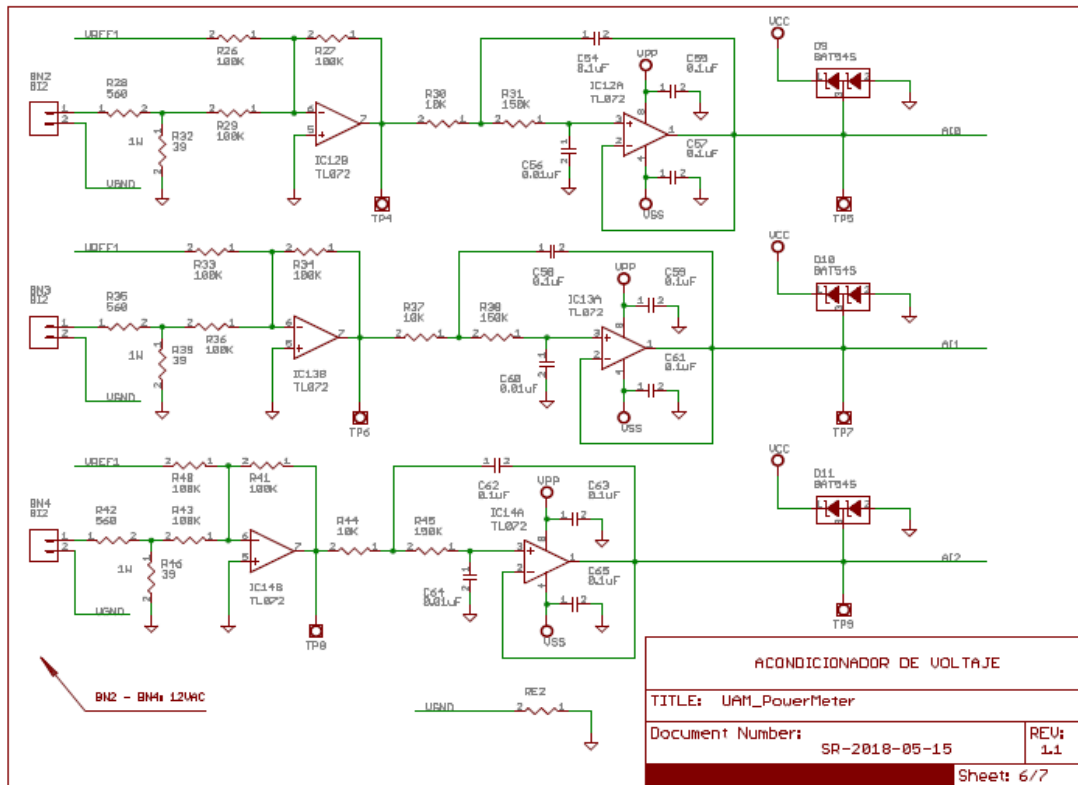


Fuente: Autor

9.1.7 Pre – Adecuación señal de voltaje

Este proceso es similar a la pre – adecuación de la señal de corriente, ya que se emplea un amplificador operacional con el fin de ajustar amplitudes de la señal y compensar voltajes de *offset*, al igual que con las señales de corriente, se implementó con el circuito integrado TL072; La salida de cada sensor de voltaje se conectó a la entrada inversora de cada uno de los tres amplificadores operacionales como se muestra en la Figura 17 y posteriormente se pasó a una etapa de filtrado.

Figura 17 Circuito acondicionador de voltaje



Fuente: Autor

9.1.8 Filtrado

Las señales adquiridas y adecuadas contienen diversas componentes frecuenciales; debido a que este prototipo se enfocó en la extracción de la componente principal, a 60 Hz de frecuencia, se requirió hacer una etapa de filtrado con el fin de eliminar las demás componentes y eliminar, así mismo, el ruido electrónico de alta frecuencia que puedan presentar las señales. Para ello se realizó un proceso de filtraje consistente en filtros pasa bajas tipo *Sallen Key* y configuración *Butterworth* con frecuencia de corte de 120 Hz, es decir con este filtro se eliminan las frecuencias superiores a los 120 Hz de las señales de corriente y de tensión que posteriormente pasarán a una etapa de post - adecuación.

9.1.9 Filtrado de la Señal de Corriente

La etapa de filtrado se implementó con el amplificador operacional TL072, el cual fue implementado para la construcción de un filtro, como se mencionó antes, tipo *Sallen Key* de segundo orden en configuración *Butterworth*, con frecuencia de corte 120Hz establecida por los valores de resistencia y capacitancia con los cuales fue construido el filtro. En la Figura 18 se presentan las conexiones y la manera en que se integran las etapas de pre- adecuación y filtrado para las tres señales de corriente obtenidas del sistema trifásico, así obteniendo a la salida una señal más limpia y robusta, lista para ser convertida de análoga a digital.

9.1.10 Filtrado de la Señal de Voltaje

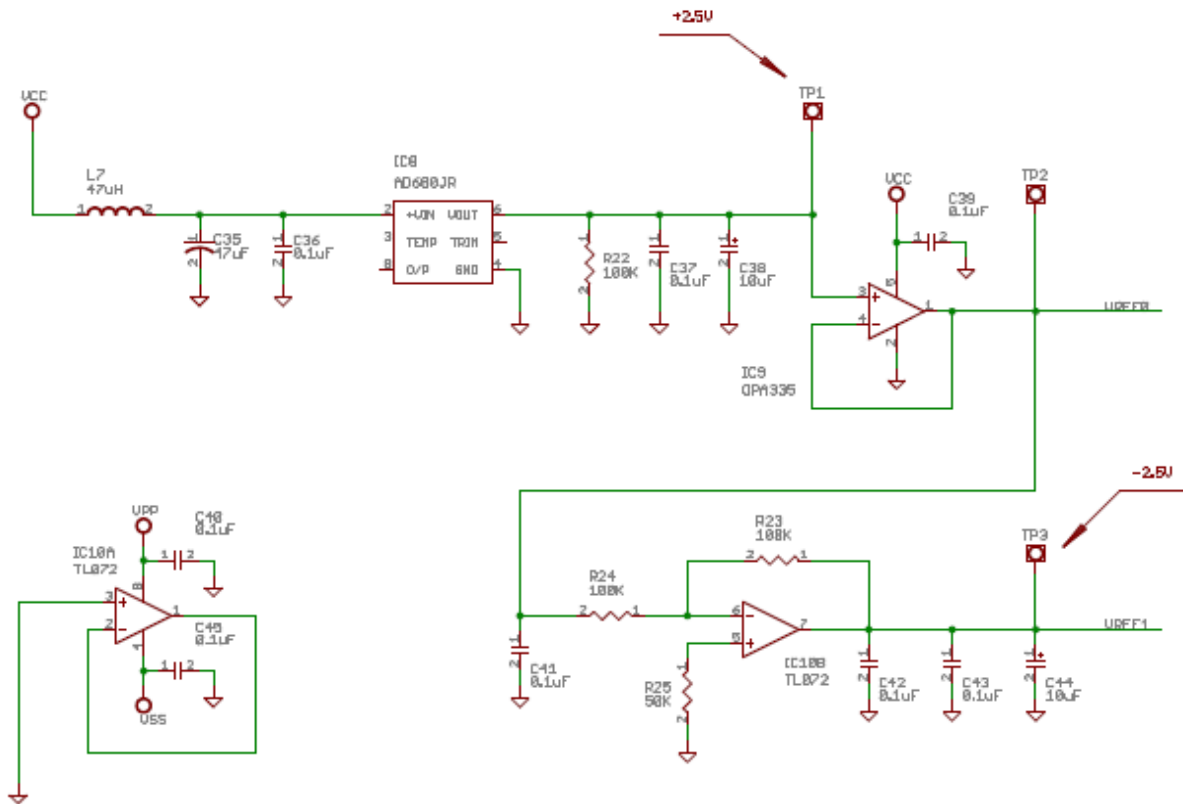
Las etapas de filtrado y adecuación de la voltaje y corriente son muy similares, para el filtrado de la señal de voltaje también se emplea un filtro tipo *Sallen Key* en configuración *Butterworth* con una frecuencia de corte de 120 Hz, la cual fue posible obtener mediante los valores de resistencia y capacitancia que conforman el filtro, el cual puede observarse en la Figura 17. El filtrado se realizó al mismo tiempo para cada una de las señales obtenidas a la salida de la etapa de pre – adecuación de las entradas de los sensores, obteniendo entonces a la salida de los filtros una señal más limpia que pasará a la etapa de post- adecuación y conversión.

9.1.11 Post - Adecuación

Luego del proceso de filtraje, las señales han sufrido modificaciones por ganancias o atenuaciones adicionales durante todos los procesos anteriormente descritos. Se debía realizar un nuevo acondicionamiento de las señales para ubicarlas entre 0 y 5 V que son los niveles aceptados por el conversor ADC. Para lograrlo, primero se adaptó la ganancia para obtener un valor pico a pico de 2.5 V y luego se le sumó un *offset* de 2.5 V para que la señal, en su totalidad, quedara libre de componentes negativas, pues un valor por debajo de -0.7V pondría en peligro la integridad del conversor ADC. Para el *offset* de 2.5 V se utilizó el circuito de referencia AD680JR de altísima exactitud ($\pm 5\text{mV}$ máx.). En Figura 18 se puede observar el circuito electrónico del sistema de referencia.

En lugar de utilizar amplificadores adicionales, se optó por aprovechar los ya existentes y se adicionó un elemento sumador a los amplificadores de adecuación de señal conectados directamente a las entradas de los sensores. Esta implementación puede

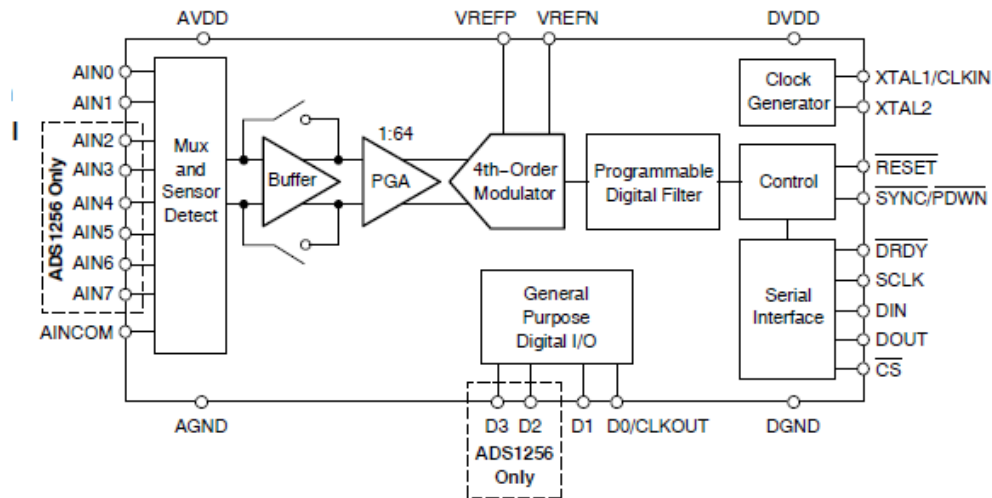
Figura 18 Circuito de niveles de referencias de voltaje



Fuente: Autor

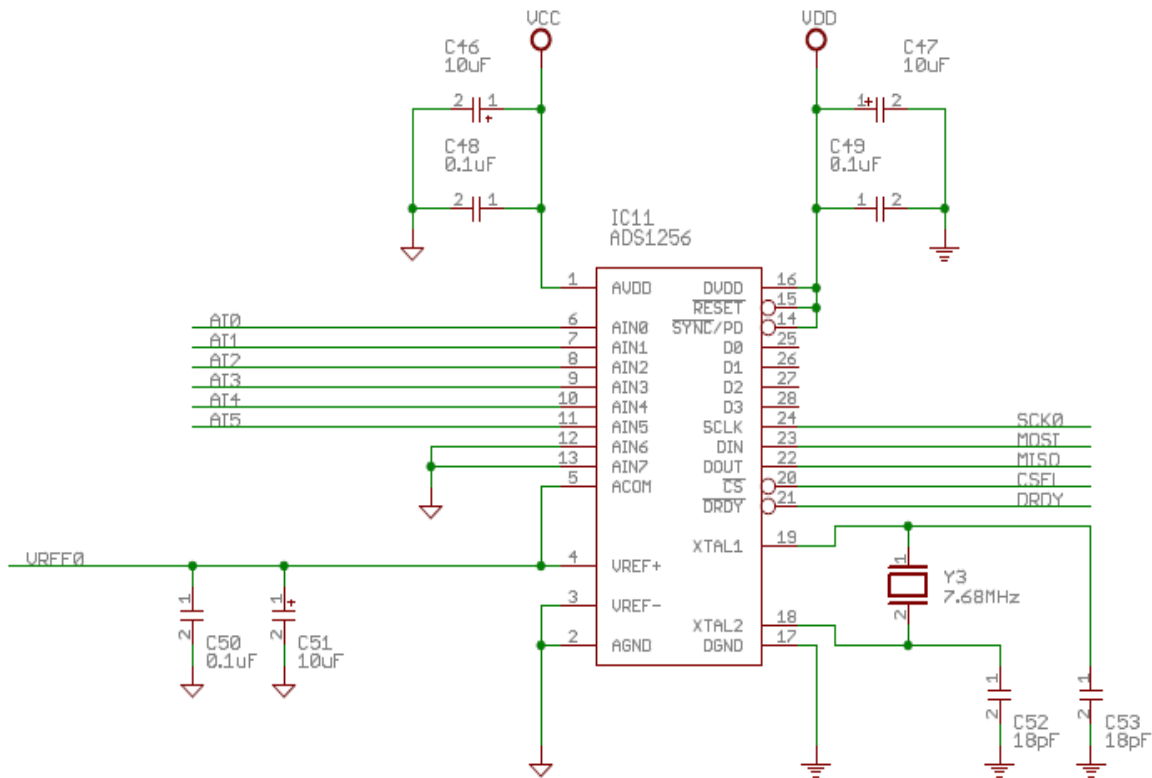
observarse con total detalle en la Figura 16, para la corriente, y en la Figura 17, para las señales de voltaje. Si se observa detenidamente, en las entradas inversoras se ha dispuesto este elemento sumador proveniente del voltaje de referencia V_{REF1} el cual es, en realidad, un valor de tensión negativo, Figura 18, pero que, al ingresar por la patilla inversora, lo que hará finalmente es sumarse a la señal del sensor.

Figura 19 Diagrama de bloques del convertor ADS1256



Fuente: [35]

Luego de este proceso de adecuación, las señales están completamente listas para ser llevadas al convertor análogo-digital (ADC). Se seleccionó el ADS1256 cuyo diagrama de bloques se puede apreciar en la Figura 19. Este convertor posee muy buenas prestaciones, resolución de 24 bits y, sobre todo, frecuencia de refresco de 1.45KHz, indispensables para este proyecto, puesto que teniendo seis señales a 60Hz se requería un mínimo de $6 \times 60\text{Hz} \times 2 = 720\text{Hz}$. La conexión de este convertor exige dos fuentes de tensión, una de 6V máximo, AVDD, y otra de 3.6V máximo, DVDD, para la obtención de estos niveles de tensión se usó el circuito mostrado en la Figura 19. Este convertor, adicionalmente, tiene la característica de poder enviar los resultados de la conversión por medio de comunicación serial y se aprovechó esta situación para realizar el respectivo envío de datos al microcontrolador, todas las conexiones detalladas se pueden apreciar en la Figura 20.



Fuente: Autor

Figura 20 Conversor ADC de 8 canales

9.2 ELEMENTOS DE CONVERSIÓN

En esta etapa se realizó la extracción de algunas características de la señal tales como: niveles de tensión proporcionales a los niveles de tensión del sistema trifásico, niveles de tensión proporcionales a las corrientes de línea, diferencia de fase entre señales de corriente y voltaje, y signo de las señales de corriente y voltaje. Se habían contemplado dos opciones: la primera, realizar este proceso de cálculo de los valores rms por *software* de bajo nivel y la segunda, realizar el proceso de extracción de los niveles de tensión por

hardware, esto es, circuitos que entreguen los valores rms. Como una de las características que se busca es la reducción de costos, se optó por la primera de estas opciones. Dentro de esta sección está el conversor ADC que recibe las señales eléctricas perfectamente adecuadas y las convierte en señales digitales para que puedan continuar su proceso de manipulación de datos este conversor realiza una multiplexación de los seis canales, tres de voltaje y tres de corriente y los envía al microcontrolador por medio de comunicación serial.

9.3 MANIPULACIÓN DE DATOS EN BAJO NIVEL

En esta etapa del proyecto, se muestrearon las señales de tensión proporcionales a la tensión entre líneas del sistema trifásico, las señales de tensión proporcionales a la corriente de cada línea, los desfases entre voltaje y corriente de cada fase y finalmente, los signos de las señales de tensión. Los valores de tensión y corriente llegan al microcontrolador provenientes del conversor ADC y se van almacenando en memoria durante un intervalo de tiempo.

Luego, mediante *software* de bajo nivel, propio de un sistema microcontrolado, se calcularon los valores rms de las señales de tensión y corriente y los valores de desfase entre cada una de ellas y enviado a la nube por medio de un dispositivo *hardware* especializado en este tipo de comunicaciones.

El cálculo de las diferentes potencias se basó en las ecuaciones (5), (6), (7), (8) y (9) utilizando, para el cálculo de las integrales, sumatorias sobre un período.

9.4 TRANSMISIÓN DE DATOS

Para la transmisión de los datos se usó tecnología *wifi*. La tarjeta electrónica desarrollada tiene, alojado en su interior, un microcontrolador secundario de dedicación exclusiva especializado en este tipo de comunicaciones. Los datos calculados por el microcontrolador principal son enviados a este microcontrolador especializado que se encarga de transmitirlos a un servidor en nube. En el proyecto se usó el servicio de nube *thingSpeak*® recomendado en la página oficial de MatLab.

9.5 INTERFAZ GRÁFICA CON DATOS EN NUBE

Como última etapa del proyecto se encuentra la interfaz gráfica que es la encargada de mostrar los gráficos de consumo de potencia y energía eléctrica y también de mantener el respectivo historial haciendo uso de espacio compartido y de herramientas gratuitas en nube.

Se implementó un programa en MatLab® que se comunica con el servidor de nube *thingSpeak*®, accede a los datos en la nube, los grafica y muestra el consumo energético al igual que algunas variables estadísticas.

9.6 PIRÁMIDE DE LA AUTOMATIZACIÓN

Como se mencionó en la sección 8.6, todas las etapas de este proyecto cumplen con las que debe tener un sistema basado en la pirámide de la automatización industrial.

En el nivel de componentes se tienen los sensores para capturar y adecuar los niveles de voltaje y corriente por fase. En otros sistemas, además de medir las variables eléctricas también se miden variables ambientales.

El nivel de dispositivos y procesos fue conformado por el sistema microcontrolado encargado de almacenar, de forma momentánea, los valores de los sensores y de estimar, mediante programación de bajo nivel, el ángulo de fase, también se encuentra el sistema HMI, en el caso de este proyecto, diseñado e implementado con MatLab, accediendo a los datos almacenados en la nube.

El nivel de procesos está compuesto por un registro constante de datos que se almacenan en la nube y que permite tener un historial de referencia. Esto permite tener una base real que sustente ahorros de energía y ayude en la eficiencia energética, también es posible almacenar los datos en el disco duro del computador mediante la misma aplicación desarrollada en MatLab.

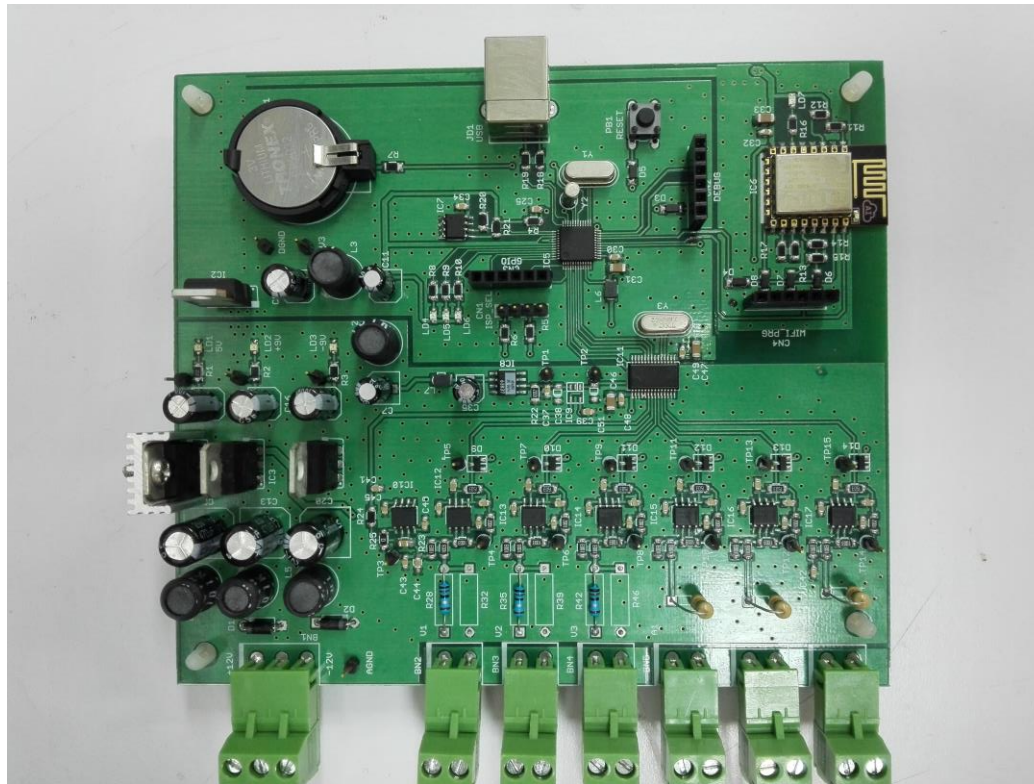
Por último, el nivel planta fue conformado por el programa gestor que realiza los cálculos de potencias, energías y variables estadísticas y además relaciona toda la

información histórica con el consumo actual para generar las correspondientes alertas por sobreconsumos.

9.7 VERIFICACIÓN

El dispositivo electrónico desarrollado se puede observar en la Figura 21. La totalidad de las etapas mencionadas anteriormente fueron incluidas en la misma tarjeta, a excepción de los módulos de los sensores.

Figura 21 Tarjeta electrónica desarrollada

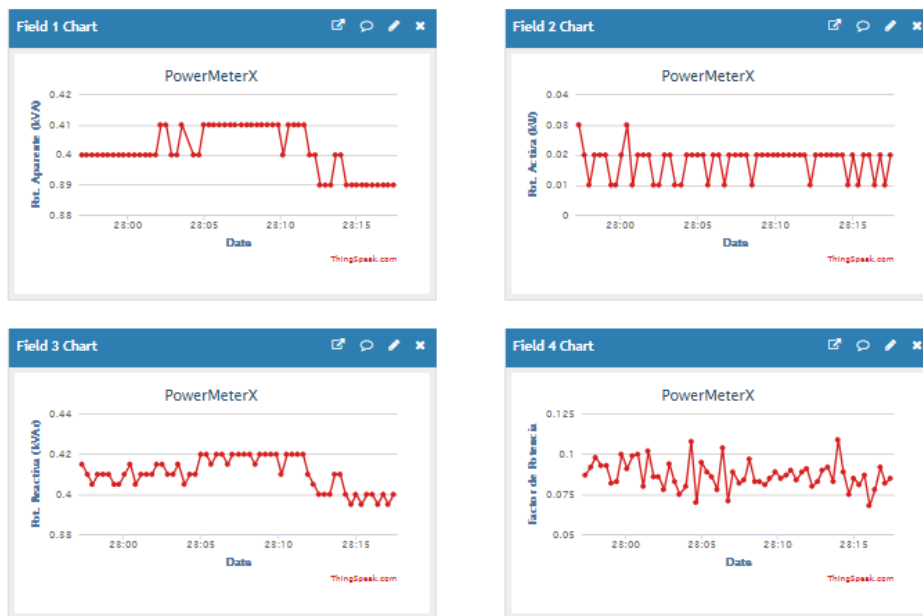


Fuente: Autor

El dispositivo se probó con un motor trifásico de 2.4 HP 220 VAC. Las variables adquiridas y procesadas por el sistema electrónico fueron enviadas a la plataforma *thinkSpeak* y posteriormente capturadas mediante un programa desarrollado en MatLab.

La Figura 22 muestra los datos almacenados en nube, enviados por la tarjeta desarrollada. En ella se detallan las potencias aparente, activa, reactiva y el factor de potencia.

Figura 22 Datos de las potencias almacenados en la nube por el equipo de medición



Fuente: Autor

La Figura 23 muestra los otros cuatro datos que envía el dispositivo, las corrientes de la línea 1, línea 2 y línea 3, y el voltaje entre la línea 1 y el neutro.

Figura 23 Datos de las corrientes y voltaje almacenados en la nube por el equipo de

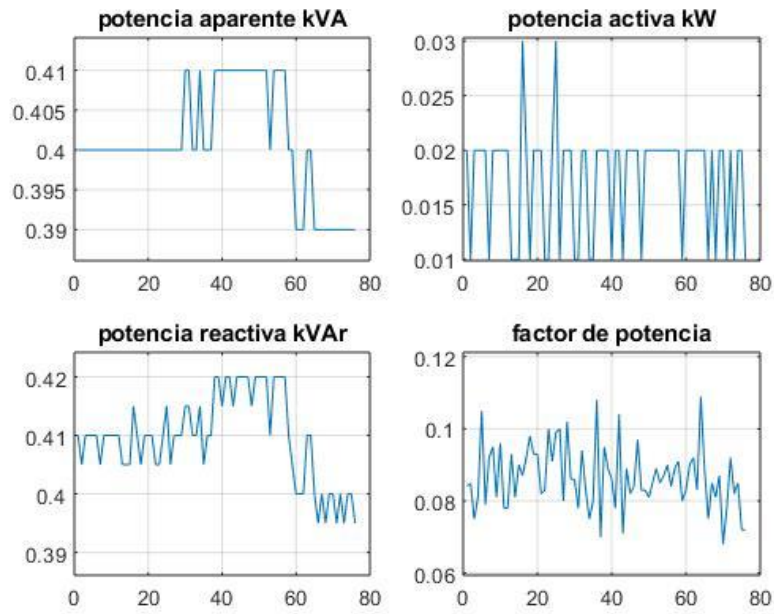


medición

Fuente: Autor

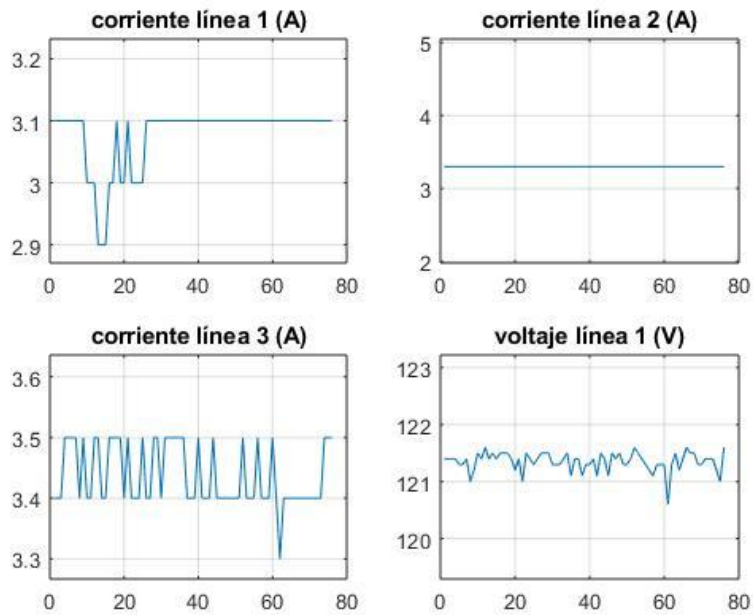
Una vez almacenados los datos en la nube, éstos pueden ser descargados a través del *software* desarrollado en MatLab. En la Figura 24 y Figura 25 pueden observarse los resultados que coinciden con los mostrados en la Figura 22 y la Figura 23.

Figura 24 Datos de las potencias descargadas de la nube



Fuente: Autor

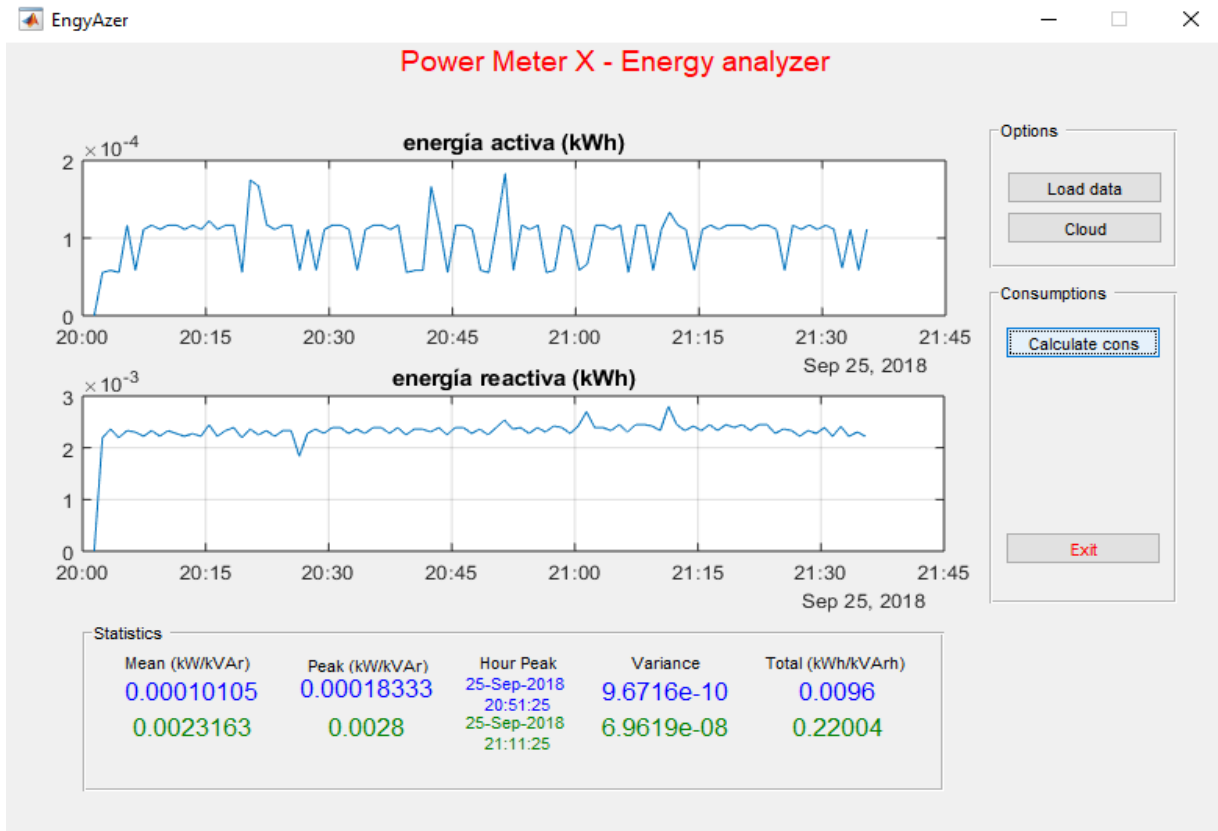
Figura 25 Datos de corrientes y voltaje descargados de la nube



Fuente: Autor

En la Figura 26 se presentan los resultados finales entregados por el *software* desarrollado en MatLab. Se observan las curvas de consumo, tanto de energía activa como reactiva, y el consolidado de cada una de ellas; estos datos fueron enviados por la tarjeta desarrollada a intervalos de un minuto y almacenados en la nube. También se puede observar que el *software* hace cálculos de algunas variables estadísticas, en concordancia con el tercer objetivo del proyecto, como el consumo promedio, en kWh/min y el kVAr/min con el cual se podrán establecer alarmas que indiquen un consumo por encima de la media habitual, el valor pico y la fecha y hora en qué ocurrió con el cual se podría conocer qué máquinas o dispositivos son los generadores de altas fluctuaciones en el consumo, y la varianza de los datos, para saber, por ejemplo, si al conectarse algunas cargas durante ciertos intervalos de tiempo influyeron en cambios razonables de consumo, para posteriores análisis.

Figura 26 Ventana del software donde se muestran los consumos de energía y valores estadísticos



Fuente: Autor

9.8 PRUEBAS

El instrumento fue probado con diferentes tipos de cargas trifásicas, las cuales están indicadas en la Tabla 3. Inicialmente, se usó carga resistiva para efectos de referenciación y calibración de sus constantes internas. Y posteriormente carga RL trifásica balanceada, carga RL bifásica para pruebas con carga desbalanceada y finalmente carga RC trifásica balanceada. En todo momento se comparó la respuesta del instrumento prototipo contra un instrumento industrial certificado. En la calibración de las constantes internas se usó un instrumento patrón marca fluke, líder en el mercado de esta clase de medidas. Luego, en las pruebas de taller se utilizó como patrón una pinza voltiamperimétrica con que cuenta la Universidad Autónoma de Manizales marca UNIT, adicionalmente, para la carga RC se contrastó la corriente medida contra la corriente arrojada por la ecuación para este tipo de carga.

Tabla 3 Cargas usadas en la verificación del instrumento

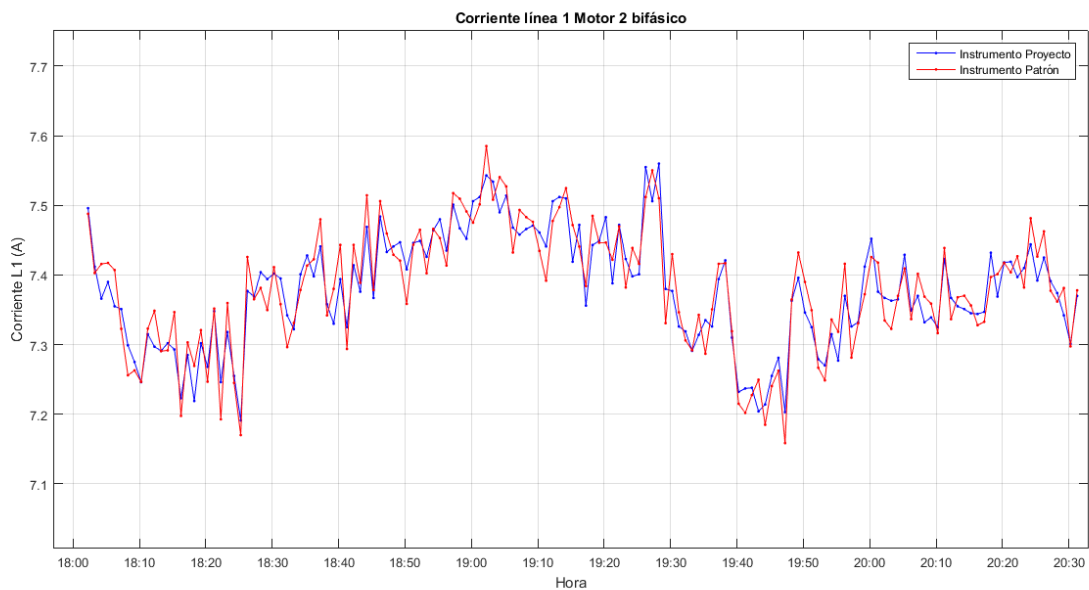
Tipo de carga	Objetivo
Resistiva (R)	Resistencia de alta potencia para calibración de constantes internas.
Resistiva (R)	Resistencia de baja potencia para ajuste fino de constantes internas.
Inductiva (RL)	Medición y comparación con una carga inductiva trifásica balanceada
Inductiva (RL)	Medición y comparación con una carga inductiva desbalanceada (bifásica).
Capacitiva (RC)	Medición con una carga capacitiva trifásica balanceada. Comparación contra ecuación.

Fuente: Autor

Antes de ponerlo a prueba con cargas inductivas, como un motor, el dispositivo fue referenciado utilizando un medidor marca Fluke 867B. Por medio de este instrumento se realizó el ajuste fino de las constantes de calibración del dispositivo. Estas constantes se encuentran a nivel de su *software* de bajo nivel.

Posteriormente, se realizaron las pruebas con cargas trifásicas resistivas (R) de diferente potencia, con motores trifásicos (RL) de 220 VAC, con una carga desbalanceada, un motor bifásico (RL) de 220 VAC y, finalmente, con carga capacitiva (RC) y se verificaron los resultados por medio de una pinza voltiamperimétrica marca UNIT referencia 231 con la cual cuenta la Universidad Autónoma de Manizales en su laboratorio de electrónica de potencia, obteniéndose un error cuadrático medio de 0.12% y un error relativo que nunca superó el 2% contrastando la medida contra la ecuación para este tipo de

Figura 27 Comparación entre corrientes del instrumento proyecto (azul) y el instrumento patrón (rojo)

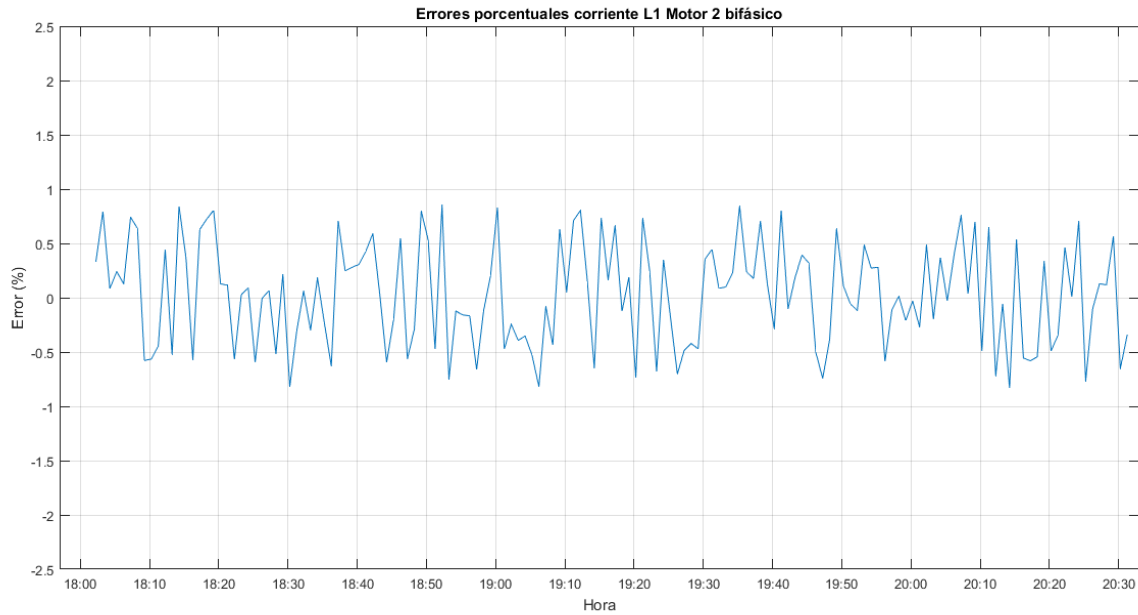


Fuente: Autor

carga. La Figura 27 muestra los datos almacenados por el instrumento desarrollado en este

proyecto (azul) con los almacenados por el instrumento de referencia (rojo) para una carga desbalanceada, un motor bifásico. También se calcularon los errores relativos para cada una de las muestras, obteniéndose la gráfica de la Figura 28.

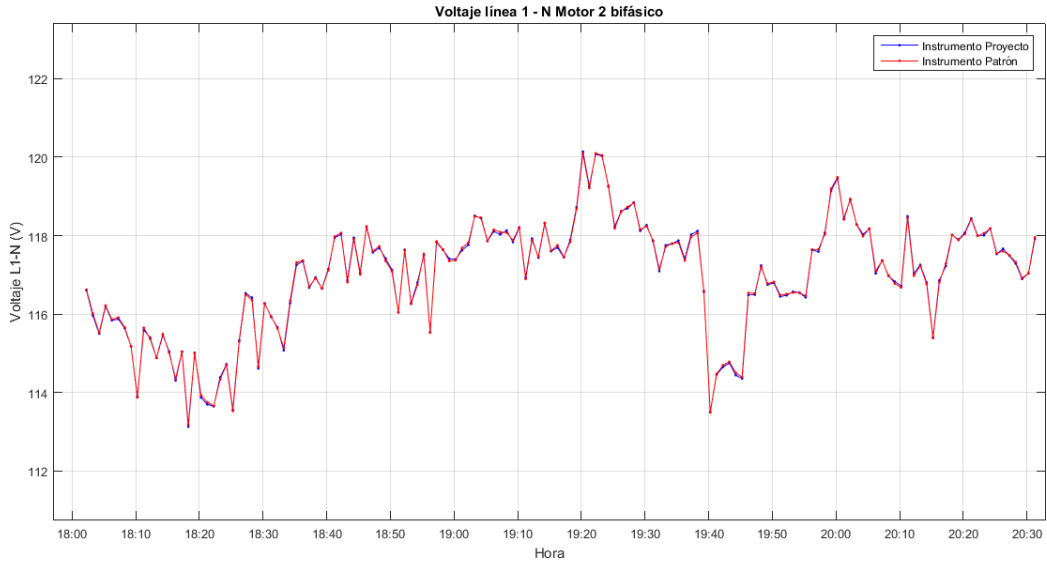
Figura 28 Errores porcentuales entre los datos del instrumento desarrollado y el de referencia



Fuente: Autor

La fidelidad de los resultados admite la posibilidad de que el dispositivo puede continuar su camino ampliándose de tal forma que permita la medición de armónicos y pueda llegar a ser utilizado de manera comercial, siempre y cuando cumpla con la normatividad asociada. En la Figura 29, por ejemplo, se observa la comparación entre los datos de tensión medidos entre la línea 1 y el neutro para el motor bifásico analizado y se puede observar que las curvas del instrumento desarrollado (azul) y el instrumento patrón (rojo) prácticamente se solapan.

Figura 29 Comparación entre voltajes del instrumento proyecto (azul) y el instrumento patrón (rojo)



Fuente: Autor

Los errores cuadráticos medios, sobre 100 muestras, arrojaron 0.12% de error para la carga RL y 0.14% de error para la carga RC comparándolos con el dispositivo patrón.

10 CONCLUSIONES

No se concibe un sistema electrónico actual, de mediana complejidad, que no conlleve un *software* asociado, ya sea que esté embebido en la misma electrónica como *software* de bajo nivel o que se comunique con una aplicación alojada en un computador, nube o dispositivo móvil. En el desarrollo de este equipo de medición se involucraron todas las etapas y partes que un sistema electrónico moderno debe contener. En la parte electrónica: adecuación de señales, filtros, fuente dual debidamente filtrada, referencias de voltaje de alta precisión, reloj de tiempo real (*Real Time Clock*, RTC), conversor analógico digital, comunicaciones seriales y *wifi*, entre otras. En cuanto al *software* de bajo nivel, se diseñaron dos programas con variables globales, locales, constantes, interrupciones, comunicaciones seriales, comunicaciones *wifi*, *buffers*, vectores, matrices, etc., es decir, se buscó ahorrar todo lo posible en cuanto a *hardware* llevando parte de la complejidad del sistema a su programa embebido. Finalmente, como elemento de interfaz entre el usuario y la máquina, se diseñó un programa en MatLab para la visualización de los datos y el cálculo de las energías asociadas al consumo en cuestión, con la ventaja de que queda disponible para que otros estudiantes puedan continuar ampliando sus características. Adicionalmente, estando en sintonía con los equipos modernos actuales, el prototipo desarrollado se enlaza con la nube usándola no solo como almacenadora de datos sino como sistema de visualización para usuarios que no tengan MatLab o que se encuentren en cualquier lugar del mundo. Incluso, si se hace público el canal, se puede compartir con otras universidades para trabajo conjunto.

Con el desarrollo del presente prototipo se ha logrado demostrar que la ingeniería local es perfectamente capaz de diseñar sistemas electrónicos robustos aplicados a la industria en general que, con el apoyo adecuado y continuidad en el tiempo, podrían rivalizar con dispositivos comerciales y ser fuente de importantes innovaciones.

La Universidad Autónoma de Manizales ha dado un primer paso muy importante en el área de la investigación de la electrónica asociada a la captura y registro de datos de consumo de energía eléctrica. La información para el diseño de estos equipos se encuentra muy difusa e incluso oculta al público en general, debido, muchas veces, a secretos

industriales. Con esta primera aproximación, se abre la puerta para que se continúen investigaciones tanto en el área de *hardware*, aportando mejoras al diseño, como en el área de *software*, mejorando las características de la interfaz gráfica o analizando los datos adquiridos.

11 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Con la implementación de este prototipo los usuarios contarán con una herramienta con la cual podrán plantear estrategias de ahorro energético basadas en datos reales.

Se busca que la Universidad Autónoma de Manizales continúe con la utilización de este dispositivo ya sea mejorando su *hardware* o su *software* o simplemente almacenando nubes de datos para posteriormente realizar análisis que permitan:

- Repotenciación o reemplazo de máquinas y equipos obsoletos por unos de última generación, con mayor eficiencia.
- Modificación de horarios o reubicación del personal para disminuir consumo en horas pico
- Utilización de energías alternativas como elemento de cogeneración: solar, eólica, etc.
- Aprovechamiento de todas las fuentes de iluminación natural y tener alumbrado inteligente.
- Desarrollo de prácticas en el área de *big data*.

Las áreas de trabajo futuro para este dispositivo pueden ser:

A nivel electrónico, cambiando la configuración de los filtros *Sallen Key* para que admitan armónicos, en primera instancia hasta el séptimo armónico ya que algunos sistemas de iluminación llegan a producirlos. También, mejorando las protecciones electrónicas en los módulos de los sensores que permitan un adecuado cuidado de la tarjeta principal.

A nivel de *software* de bajo nivel, el programa fue diseñado de tal forma que se pueda agregar funciones que permitan el cálculo de la transformada de Fourier para análisis de armónicos, y además, pensando en esto, se seleccionó un microcontrolador de altas prestaciones que admite esta opción. También dentro de esta categoría se puede diseñar una

interfaz gráfica, más amigable, que permita el cambio de parámetros del dispositivo y la recepción de datos vía comunicación serial.

En cuanto a su programación de alto nivel, el sistema se presta para almacenar nubes de datos de grandes dimensiones con las cuales se pueden realizar trabajos en el área de *big data* con la línea de energía del doctorado en Ingeniería que la Universidad Autónoma de Manizales tiene. También se pueden agregar características al *software* desarrollado en MatLab que permitan realizar análisis de predicciones de consumo de energía eléctrica.

12 REFERENCIAS

- [1] Amazon, «Energy Quality Analyzers Three Phase,» 2018. [En línea]. Available: https://www.amazon.com/s/ref=nb_sb_noss_2?url=bbn%3D230659011%26search-alias%3Daps&field-keywords=energy%2Bquality%2Banalyzer%2Bthree%2Bphase.
- [2] Fluke, 2018. [En línea]. Available: https://www.amazon.com/Fluke-435-II-Three-Phase-Analyzer/dp/B00AQKI4AC/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1517959090&sr=8-1&keywords=energy+quality+analyzer+three+phase..
- [3] GOWE, 2018. [En línea]. Available: https://www.amazon.com/Three-Phase-Energy-Quality-Analyzer/dp/B01GMGJ9JS/ref=sr_1_3?ie=UTF8&qid=1517959090&sr=8-3&keywords=energy+quality+analyzer+three+phase..
- [4] NTPM, 2018. [En línea]. Available: https://www.amazon.com/NTPM-100A-Quality-Analyzer-Recorder/dp/B07886BZZB/ref=sr_1_7?ie=UTF8&qid=1517959090&sr=8-7&keywords=energy+quality+analyzer+three+phase..
- [5] SA21, 2018. [En línea]. Available: https://www.amazon.com/SA2100-Quality-Analyzer-Logger-Recorder/dp/B01MTKCZU8/ref=sr_1_8?ie=UTF8&qid=1517959090&sr=8-8&keywords=energy+quality+analyzer+three+phase..
- [6] R. Missaoui, H. Joumaa, S. Ploix y S. Bacha, «Managing energy Smart Homes according to energy prices: Analysis of a Building Energy Management System,» *Energy Build*, vol. 71, pp. 155-167, 2014.

- [7] F. Doyle, M. J. R. Duarte y j. Cosgrove, «Design of an Embedded Sensor Network for Application in Energy Monitoring of Commercial and Industrial Facilities,» de *7th International Conference Sustainable Energy Building Design*, 2015.
- [8] L. Zhao, J. L. Zhang y R. B. Liang, «Development of an energy monitoring system for large public buildings,» *Energy Build*, vol. 66, nº 0, p. 41–48, 2013.
- [9] A. B. Ramazan Bayindir, E. Irmak y I. Colak, «Development of a real time energy monitoring platform,» *Electr. Power Energy Syst*, vol. 33, pp. 137-146, 2011.
- [10] P. H. Shaikh, N. B. M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi y T. Ibrahim, «A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings,» *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 409-429, 2014.
- [11] V. Marinakis, H. Doukas, C. Karakosta y J. Psarras, «An integrated system for buildings' energy-efficient automation: Application in the tertiary sector,» *Applied Energy*, vol. 101, pp. 6-14, 2013.
- [12] H. U. Gorke, «Multi dimensional energy monitoring, analysis and optimization system for energy efficient building operations,» *Sustain. Cities Soc.*, vol. 10, pp. 161-173, 2014.
- [13] A. P. Batista, M. E. Freitas y F. G. Jota, «Evaluation and improvement of the energy performance of a building equipment and subsystems through continuous monitoring,» *Elsevier*, 2014.

- [14 L. Burgas, J. Melendez, J. Colomer, J. Massana y C. Pous, «Multivariate
] statistical monitoring of buildings. Case study: Energy monitoring of a social
housing building,» *Energy Build*, vol. 103, pp. 338-351, 2015.
- [15 International Atomic Energy Agency, «Energy, Electricity and Nuclear
] Power Estimates for the Period up to 2050,» IAEA, Viena, 2014.
- [16 T. Sharmin, M. Gül, X. Li, V. Ganev, I. Nikolaidis y M. Al-Hussein,
] «Monitoring building energy consumption, thermal performance, and indoor air
quality in a cold climate region,» *Sustain. Cities Soc*, vol. 13, pp. 57-68, 2014.
- [17 ACEE Consultores, «Ahorro y Calidad de Energía,» ACEE, [En línea].
] Available: <http://www.acee.com.mx/sistemas-de-monitoreo-de-indicadores-energeticos>. [Último acceso: 15 04 2016].
- [18 ISO 50001, «Sistemas de gestión de la energía,» 2011.
]
- [19 Icontec, NTC 5019, «Selección de Equipos de medición de Energía
] Eléctrica,» 2007.
- [20 Icontec, NTC 5226, «Equipos de medición de energía eléctrica (C.A).
] Requisitos generales, ensayos y condiciones de ensayo,» 2003.
- [21 Icontec, NTC 2147, «Equipos de medición de energía eléctrica (C.A).
] Requisitos particulares. Medidores estáticos de energía activa (Clases 0,2 S y
0,5 S),» 2003.
- [22 Icontec, NTC 2148, «Electrotecnia, medidores de energía activa,» 1989.
]

- [23 Icontec, NTC 2288, «Equipos de medición de energía eléctrica (C.A).
] Requisitos particulares. Medidores electromecánicos de energía activa (Clases 0,5, 1 y 2),» 2003.
- [24 Icontec, NTC 4052, «Equipos de medición de energía eléctrica (C.A).
] Requisitos particulares, medidores de energía activa (Clases 1 y 2),» 2003.
- [25 Icontec, NTC 4569, «Equipos de medición de energía eléctrica (C.A).
] Requisitos particulares. Medidores estáticos de energía reactiva (Clases 2 y 3),» 2003.
- [26 Icontec, NTC 4856, «Verificación inicial y posterior de medidores de
] energía eléctrica,» 2006.
- [27 M. Ruellan, H. Park y R. Bennacer, «Residential building energy demand
] and thermal comfort: Thermal dynamics of electrical appliances and their impact,» *Energy Build*, vol. 130, pp. 46-54, 2016.
- [28 L. Mazarella, «Energy retrofit of historic and existing buildings. the
] legislative and regulatory point of view,» *Energy Build*, vol. 95, pp. 23-31, 2015.
- [29 J. Ma y J. Cheng, «Identifying the influential features on the regional
] energy use intensity,» *Applied Energy*, n° 183, pp. 192 - 201, 2016.
- [30 J. Edminister, Circuitos Eléctricos, Akron: Mc Graw Hill, 1965.
]
- [31 A. Souza Guedes, S. Magalhaes Silva, B. d. J. Cardoso Filho y C.
] Alvarez Conceicao, «Evaluation of electrical insulation in three-phase induction motors and classification of failures using neural networks,» *Electric Power Systems Research j*, vol. 140, pp. 263-273, 2016.

- [32 R. Saidur, «A review on electrical motors energy use and energy savings,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 877-898, 2010.
- [33 ABB Motors, «Guía del motor: Información técnica básica de motores de inducción de baja potencia».
- [34 ZES ZIMMER, «Application Note 105 Power measurement and its theoretical background».
- [35 P. Purkait, B. Biswas, S. Das y C. Koley, *Electrical and Electronics Measurements and Instrumentation*, McGraw Hil, 2013.
- [36 J. Balcells y J. L. Romeral, *Autómatas Programables*, Alfaomega.
- [37 *Vocabulario Internacional de Metrología*, 2012.
- [38 S. Tanzia, M. Gul, X. Li, V. Ganev y I. Nikolaidis, «Monitoring building energy consumption, thermal performance, and indoor air quality in a cold climate region,» *Sustainable Cities and Society*, nº 13, pp. 57 - 68, 2014.
- [39 ABB Motors, «Guía del motor,» [En línea]. [Último acceso: 20 4 2017].
- [40 Texas Instruments, *Very Low Noise Analog to Digital Converter ADS1256*.
- [41 International Electrotechnical Commission, «Norma ISO 50001:2011».