

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**“DESARROLLO DE NUEVAS METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN  
DEL USO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL SECTOR COMERCIAL,  
INDUSTRIAL Y DE SERVICIOS”**

**TESIS:**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
“DOCTOR EN INGENIERÍA”**

**PRESENTA:**

**DIEGO RAMÓN BONILLA GARCÍA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. HÉCTOR ENRIQUE CAMPBELL RAMÍREZ**

**CODIRECTOR DE TESIS:**

**DR. ROGELIO RAMOS IRIGOYEN**

# Universidad Autónoma de Baja California

## INSTITUTO DE INGENIERÍA

Oficio No. 455/2018-1

**Diego Ramón Bonilla García**  
**ALUMNO(A) Diego Ramón Bonilla García**  
**PRESENTE**

En relación con la solicitud presentada para la asignación del comité revisor de su tesis de grado titulada "*Desarrollo de nuevas metodologías para la evaluación del uso de energía eléctrica en el sector comercial, industrial y de servicios*", la cual fue dirigida por el (la) **Dr. Héctor Enrique Campbell Ramírez**, me permito comunicarle que el Subcomité Académico de Química Energía del Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de este Instituto, le ha designado para la revisión de tesis y como miembros del jurado de su examen de grado de **Doctorado en Ingeniería** a los siguientes sinodales:

Presidente: Dr. Héctor Enrique Campbell Ramírez  
Sinodal Propietario: Dr. Rogelio Arturo Abraham José María Ramos Irigoyen  
Sinodal Primero: Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega  
Sinodal Segundo: Dr. Conrado García González  
Sinodal Secretario: Dra. Margarita Gil Samaniego Ramos

Sin otro particular por el momento, quedo de usted.

**ATENTAMENTE**  
**"POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL HOMBRE"**  
Mexicali, Baja California, 9 de Mayo de 2018

  
**DRA. GISELA MONTERO ALPÍREZ**  
**DIRECTORA**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE BAJA CALIFORNIA



INSTITUTO DE  
INGENIERÍA

C.c.p. Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega. Coordinador de Posgrado, II  
Expediente.  
Archivo/Minutario.  
GMA/MACO

## DESCRIPCIÓN DE LA OBRA Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

---

En este trabajo de investigación y desarrollo se aborda el tema de ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica (EnE). Y específicamente, sobre la utilización de Sistemas de Gestión de Energía (SGEn) como herramientas para hacer uso eficiente de este valioso recurso. Además, se dirige hacia la cuantificación de los impactos económicos y ambientales como resultado de su aplicación.

En la realización de este trabajo, inicialmente se llevó a cabo una previa investigación sobre los SGEn que actualmente se ofrecen en el mercado regional y nacional y, que están diseñados para empresas e instituciones dentro de los sectores comercial, industrial y de servicios. Además, se realizó una revisión de diversos artículos de investigación científica publicados en editoriales reconocidas alrededor del mundo como son ELSEVIER y MDPI, entre otras. Cabe destacar la publicación del artículo denominado como “Practical and low-cost monitoring tool for building energy management systems using virtual instrumentation” en la revista con nombre “Sustainable Cities and Society” de la editorial ELSEVIER (ver anexo A). El factor de impacto de esta revista durante el año de publicación fue del 1.777.

El resultado de las investigaciones y la publicación del artículo demostraron que los SGEn actuales presentan importantes inconvenientes técnicos y económicos que pueden afectar a los usuarios interesados en obtener los beneficios de la gestión. Por lo tanto, se encontró la oportunidad de resolver esta problemática mediante la desarrollo de nuevas metodologías dirigidas a los SGEn.

Las metodologías desarrolladas están compuestas por una herramienta de monitoreo y un modelo de diagnóstico para la evaluación del uso de la EnE. La

parte medular de este documento es la descripción del diseño, desarrollo y validación en campo de las herramientas de monitoreo desarrolladas debido a que éstas conforman la parte innovadora del estudio.

En el capítulo 1, la parte introductoria expone la importancia del tema que se aborda y define en el trayecto algunos términos que servirán al lector para una mejor comprensión del estudio. Después, se describe la problemática, los antecedentes y la importancia de la investigación. En este apartado, se explican las razones por las cuales se utilizó la tecnología de instrumentación virtual como estrategia para lograr la creación de metodologías de carácter innovador. Finalmente, se plantean los alcances y limitaciones así como, las hipótesis, objetivos y la meta del estudio.

En el capítulo 2, se describen las características y elementos de las metodologías desarrolladas. Como parte medular de este capítulo, se acentúan las cualidades de las herramientas de monitoreo y de los modelos de diagnóstico para la evaluación del uso de la EnE.

En el capítulo 3, se describe el proceso de validación en campo. Para ello, se inicia con la descripción de los casos de estudio y los pasos que conllevaron a la implementación de las metodologías. Consecutivamente, se presentan el análisis y discusión de los resultados obtenidos, así como las recomendaciones que gradualmente mostrarán la evaluación del uso de la EnE.

En el capítulo 4, se presentan las conclusiones finales con base en los resultados del trabajo de investigación. Se resume la importancia de este trabajo con respecto al tema abordado y se reiteran las contribuciones más importantes obtenidas y que fueron sustento para la creación de metodologías innovadoras.

Además, se incluyen las conclusiones específicas con respecto a los objetivos y las hipótesis planteadas al inicio de la investigación.

En el apartado final, se hace mención sobre los proyectos en los cuales se está colaborando actualmente y que consisten de los casos de estudio que se utilizaron para la validación en campo. Finalmente, se analizan las contribuciones obtenidas destacando su importancia para la potencial generación de nuevos proyectos de investigación.

## RESUMEN

---

La temática que aborda este documento es el ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica (EnE). Es muy importante cuidar este recurso ya que está ligado directamente al pago de la factura del servicio eléctrico y de forma indirecta a la contaminación ambiental. Esto último es referido popularmente como la huella de carbono.

Los sujetos de estudio son empresas e instituciones dentro del sector comercial, industrial y de servicios debido a que presentan comúnmente un alto consumo de EnE y cuyo precio medio es hasta un 82.31% mayor comparado con el residencial y el agrícola. Por lo tanto, el costo derivado del uso cotidiano de la EnE puede formar parte significativa de sus egresos. Además, en este rubro, un monto importante generado de huella de carbono puede crear una mala imagen ante la sociedad e inclusive sanciones con sentido ambiental.

En este documento se propone el uso de Sistemas de Gestión de Energía (SGEn) para hacer uso eficiente de la EnE. Los SGEn hacen referencia a la utilización de herramientas de medición y/o control, así como, modelos de diagnóstico para reducir el consumo mejorando usos, eficiencias y rendimientos. Por lo tanto, sin un SGEn, una empresa o institución puede estar pagando periódicamente un costo adicional de EnE que se acumulará con el tiempo y eventualmente, generará un egreso anual importante que puede restar competitividad a la empresa.

En el campo de la investigación, se han desarrollado una amplia diversidad de herramientas y modelos de diagnóstico dirigidos a los SGEn. Hoy en día, desde

el mercado regional hasta el internacional, estos pueden hallarse en forma de productos y servicios, respectivamente.

El problema medular radica en la falta de practicidad de uso y/o rentabilidad que presentan tanto los resultados de otras investigaciones como en el mercado. Principalmente, y visto desde la perspectiva del usuario, tienen una alta complejidad para su implementación y un alto costo de inversión. Estas circunstancias suelen crear un escenario que desfavorece al interés de clientes potenciales y en consecuencia, afecta la popularización de proyectos afines aunque sean claros los beneficios económicos, ambientales e inclusive sociales que se pueden obtener.

Este trabajo presenta la solución al problema medular mediante el desarrollo de nuevas metodologías para la evaluación del uso de la EnE. Las metodologías están compuestas por herramientas de monitoreo prácticas de bajo costo y modelos de diagnóstico sencillos de implementar. Ambos, fueron desarrollados con el apoyo de especialistas en el ramo así como los usuarios (empleados y administradores) con la finalidad de cumplir con los requerimientos de información y desarrollar SGEN amigables.

La innovación de este trabajo de investigación se sustenta con la creación de herramientas de monitoreo capaces de satisfacer las necesidades específicas que pueda presentar cualquier tipo de usuario. Son herramientas flexibles diseñadas acorde a los requerimientos del usuario final y a diferentes especialistas.

Las herramientas de monitoreo se basan en el desarrollo de instrumentos virtuales en la plataforma de programación de LabVIEW®. Un instrumento virtual es en esencia una aplicación de software que orquesta diferentes tecnologías convencionales, como son: una computadora, equipo de medición seleccionado a

la medida y dispositivos que favorecen la transmisión de datos. Finalmente, una computadora se convierte en el instrumento de monitoreo que realiza la medición, procesamiento y despliegue de resultados.

Las herramientas de monitoreo presentan la cualidad de mostrar en la pantalla de la computadora las variables que se están monitoreando de una forma atractiva mediante indicadores numéricos e ilustraciones gráficas en tiempo real. Otras cualidades importantes es la inclusión de tecnología de transmisión remota de datos como es la radiofrecuencia (RF) y los servicios de información distribuida a través de internet. Con el uso de esta última tecnología, el usuario puede interactuar con la herramienta de monitoreo en línea y acceder a los registros desde cualquier ubicación geográfica.

La primera metodología fue desarrollada para la gestión de EnE en edificios. La herramienta de monitoreo delegada se denomina como Sistema de Ahorro Remoto (SisAR). SisAR es un instrumento virtual que provee de datos en tiempo real sobre parámetros básicos del sistema eléctrico, perfil de potencia horario, huella de carbono y costos de facturación acorde a la metodología establecida por el proveedor del servicio. La validación de SisAR se llevó a cabo en un edificio actualmente en uso por la Universidad Autónoma del Estado de Baja California (UABC) ubicada en Mexicali, B.C., México. Como resultados principales se exponen los siguientes datos: caída de voltaje máxima de 7.5%, desbalance máximo de corriente de 52.4%, penalización por factor de potencia del 2%, elevado consumo de energía en días no hábiles de hasta el 64% con respecto a días hábiles, indicadores de consumo energético de 56.49 kWh/empleado y 0.99 kWh/m<sup>2</sup>, un indicador de huella de carbono de 2.62 tCO<sub>2eq</sub>/semana relacionado al consumo de EnE y un costo semanal de \$13,997.70 MXN debido al uso de EnE en el edificio. La discusión de los resultados presenta una seria problemática concerniente al

suministro eléctrico que puede afectar la confiabilidad del servicio. Se recomienda una mejor administración en el encendido de las cargas principales como son la iluminación interior y exterior, así como, del sistema de aire acondicionado debido al alto costo semanal y huella de carbono relacionada al consumo, especialmente en días no hábiles.

La segunda metodología fue desarrollada para la gestión de EnE en plantas de distribución de agua cuya principal carga eléctrica es el sistema de bombeo. La herramienta de monitoreo delegada se ha denominado como Monitor de Parámetros de Bombas (MPB). MPB es un instrumento virtual desarrollado en LabVIEW® que proporciona información sobre los parámetros eléctricos e hidráulicos de una bomba en operación, como son: flujo de agua, presión manométrica, potencia eléctrica, carga hidráulica por velocidad, pérdidas por fricción, carga hidráulica total, potencia hidráulica, eficiencia electromecánica y eficiencia global de bombeo. MPB cuenta con la cualidad adicional de proporcionar las curvas características de operación de la bomba que muestran las siguientes relaciones: gasto – carga total de bombeo, gasto – potencia eléctrica y gasto – eficiencia global. La validación de este sistema se llevó a cabo en una planta de tratamiento de agua que abastece la ciudad de Mexicali, B.C. México. Como resultados principales se obtuvo la siguiente información: flujo volumétrico de 406 m<sup>3</sup>/s, presión manométrica de 52.93 psi, carga total dinámica de 43.1 m, potencia hidráulica de 171 kW, eficiencia electromecánica de 61.8%, eficiencia global de 65.7% y las curvas características de la bomba durante su operación. En conclusión, se determinó un ahorro potencial de \$ 744,292.27 MXN y una reducción de huella de carbono de 118.98 tCO<sub>2eq</sub>/anuales debido al consumo de EnE si la bomba operara en óptimas condiciones. Debido a ello, la sustitución de la bomba fue la recomendación principal.

Por medio del desarrollo de instrumentos virtuales en LabVIEW® se logró la creación de herramientas de monitoreo innovadoras cuyas características especiales son capaces de abatir técnica y económicamente propuestas similares que existen en el mercado. Además, se optimizaron modelos de diagnóstico convencionales para facilitar la evaluación del uso de la EnE. Por lo tanto, son las contribuciones más importantes.

El costo que conlleva la inversión para la implementación de SisAR y MPB es aproximadamente 50% menor que el disponible en el mercado incluyendo el equipamiento y las capacitación. Como referencia, las aplicaciones de software desarrolladas fueron protegidas bajo la figura de derecho de autor ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR) y, cuentan con los números de registro 03-2017-012613294400-01 y 03-2017-121912432600-01, respectivamente (ver anexos B y C).

En resumen, el primer propósito de este documento es presentar las características y cualidades de las metodologías desarrolladas y su validación en campo. El proceso de validación incluye la implementación, análisis y discusión de resultados para evaluar el uso de la EnE en los casos de estudio seleccionados.

El segundo propósito de esta investigación es brindar nuevas metodologías que faciliten las actividades concernientes a un SGen y que sean el punto de partida para la creación de nuevos sistemas inteligentes prácticos y rentables.

# ÍNDICE GENERAL

---

Descripción de la obra y metodología de trabajo .....	III
Resumen .....	VI
Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1 Usuarios de alto consumo.....	3
1.2 Antecedentes.....	6
1.2.1 Gestión energética en edificios.....	7
1.2.2 Gestión energética en bombas.....	9
1.3 Importancia del trabajo .....	11
1.3.1 Instrumentación virtual como estrategia.....	13
1.4 Alcances y limitaciones .....	15
1.5 Hipótesis.....	16
1.6 Objetivos y Meta.....	17
Capítulo 2: Metodologías .....	19
2.1 Sistema de Ahorro Remoto (SisAR).....	21
2.1.1 Materiales y métodos.....	22
2.1.2 Aplicación de software.....	26
2.1.3 Modelo de diagnóstico .....	30
2.2 Monitor de Parámetros de Bombas (MPB).....	32
3.2.2 Materiales y métodos.....	33
2.3.3 Aplicación de software.....	35
2.2.1 Modelo de diagnóstico .....	40
Capítulo 3: Implementación y validación en campo, resultados y discusión .....	42
3.1 Implementación de SisAR en un edificio.....	42
3.1.1 Caso de estudio .....	42
3.1.2 Procedimiento, resultados y discusión .....	44
3.1.3 Evaluación.....	49
3.2 Implementación de MPB en una bomba.....	57
3.2.1 Caso de estudio .....	57
3.2.2 Procedimiento, resultados y discusión .....	58

3.2.3 Evaluación.....	65
Capítulo 4: Conclusiones.....	72
Continuidad y trabajos futuros .....	76
Referencias .....	78
Anexos .....	87

## Lista de Tablas

Tabla 1. Proveedores de SGen para la evaluación del uso de EnE en edificaciones .....	8
Tabla 2. Proveedores de SGen para la evaluación del uso de EnE en sistemas de bombeo .....	10
Tabla 3. Características del equipo de medición eléctrica utilizado por SisAR .....	23
Tabla 4. Características de los instrumentos de comunicación utilizados por SisAR. ....	24
Tabla 5. Características de la computadora utilizada por SisAR .....	25
Tabla 6: Bloques de programación del instrumento virtual SisAR.....	29
Tabla 7. Características del medidor de flujo de agua y de presión utilizados por MPB.....	33
Tabla 8. Características de los instrumentos de comunicación utilizados por MPB. ....	34
Tabla 9. Características de la computadora utilizada por MPB.....	35
Tabla 10: Bloques de programación de la aplicación de software de MPB.....	39
Tabla 11. Características generales del edificio donde fue implementado SisAR .....	43
Tabla 12. Indicadores de rendimiento fijo .....	50
Tabla 13. Factor de potencia diario.....	54
Tabla 14. Indicadores energéticos y huella de carbono. ....	55
Tabla 15. Desglose del costo de la EnE e indicadores de costos (\$MXN).....	56

## Lista de Figuras

Figura 1. Porcentaje de usuarios dentro de las tarifas de CFE.....	3
Figura 2. Consumo promedio mensual de EnE por usuario de cada sector en el 2017 (kWh) .....	3
Figura 3. Precios medios anuales de energía eléctrica por sector .....	4

Figura 4. Escalamiento de precios de la electricidad por sector tarifario.....	5
Figura 5. Etapas principales de diseño de SisAr y MPB.....	20
Figura 6. Componentes del equipo de medición eléctrica utilizado por SisAR: a) Medidor eléctrico, b) Transformadores de corriente y c) Conectores tipo cocodrilo .....	23
Figura 7. Instrumentos de comunicación utilizados por SisAR: a) Router Wi-Fi y b) Convertidor USB a RS-485 .....	24
Figura 8. Computadora utilizada por SisAR.....	25
Figura 9. Esquema de operaciones de la aplicación de software de SisAR .....	27
Figura 10. Diagrama de bloques del instrumento virtual SisAR.....	28
Figura 11. Esquema de operaciones para la evaluación del uso de la EnE en pequeños y medianos edificios.....	31
Figura 12. a) Equipo de medición de flujo de agua y b) Transductor de presión manométrica .....	33
Figura 13. Instrumentos de comunicación utilizados por MPB: a) Transmisor RF, b) Receptor RF y c) Convertidor USB a RS-485 .....	34
Figura 14. Computadora utilizada por MPB.....	35
Figura 15. Arquitectura de funciones de monitoreo de MPB .....	36
Figura 16. Bloques de programación que forman parte del instrumento virtual MPB que se desarrolló en la plataforma LabVIEW 2013®.....	38
Figura 17. Información básica utilizada para la construcción de las curvas OC.....	40
Figura 18. Fases de desarrollo del modelo de diagnóstico para la evaluación de EnE en bombas.....	41
Figura 19. Imagen virtual del edificio bajo estudio.....	42
Figura 20. Equipo de medición eléctrica de SisAR ubicado en el centro de carga principal: (a) Transformadores de corriente; (b) cables de voltaje; (c) Medidor eléctrico .....	44
Figura 21. Computadora, aplicación de software e instrumentos de comunicación de SisAR .....	45
Figura 22. Primer grupo de información (parámetros eléctricos y huella de carbono) de la aplicación de software de SisAR.....	46

Figura 23. Segundo grupo de información (costos de electricidad) de la aplicación de software de SisAR .....	47
Figura 24. Tercer grupo de información (perfil de demanda) de la aplicación de software de SisAR.....	48
Figura 25. Perfil de demanda diaria y horaria .....	51
Figura 26. Promedio diario del valor de las corrientes en el sistema eléctrico del edificio bajo estudio .....	52
Figura 27. Histórico de consumo diario de EnE .....	55
Figura 28. Bomba vertical de la planta de tratamiento de agua bajo estudio.....	57
Figura 29. Equipo de medición y transmisión de datos de MPB instalados en la bomba ...	58
Figura 30. Equipo de medición de parámetros eléctricos instalado en el centro de carga de la bomba .....	59
Figura 31. Computadora equipada con la aplicación de software denominada MPB e instrumentos para la recepción alámbrica e inalámbrica de datos .....	60
Figura 32. Primer grupo de datos (sección 1) de la aplicación de software de MPB.....	62
Figura 33. Segundo grupo de datos (sección 2) de la aplicación de software denominada MPB.....	64
Figura 34. Gráfica de rendimiento del proveedor de la bomba.....	66
Figura 35. Curva de potencia en función del caudal, obtenida con MPB .....	67
Figura 36. Curva de eficiencia en función del caudal, obtenida con MPB.....	67
Figura 37. Curva de TDH en función del caudal, obtenida con MPB.....	68

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

La Energía Eléctrica (EnE) es un recurso imprescindible para el desarrollo social, económico y tecnológico de cualquier país en el mundo. Es el tipo de energía más popular pues tiene características muy útiles ya que es fácil de transportar y de convertir en otros tipos de energía como la mecánica, luz y calor. En México, la EnE es un recurso mayormente suministrado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y cuyo precio se ve afectado principalmente por 2 factores: la constante alza en el precio de las materias primas necesarias para su generación como lo son los combustibles fósiles y a la administración de subsidios otorgados por el gobierno federal.

Hay varias razones por las que un usuario del servicio eléctrico debería ahorrar tanta EnE como sea posible, entre las más importantes son: asegurar la confiabilidad del sistema eléctrico, la reducción del pago de facturación de electricidad y la mitigación del impacto que se produce en la contaminación ambiental. Esto último es referido popularmente como la “huella de carbono” y se refiere al recuento de las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ) que son liberadas a la atmósfera en relación directa al consumo de EnE [1].

Acorde con el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), las empresas e instituciones deben elaborar y llevar a cabo un plan de acciones de eficiencia acorde a sus necesidades y con base en la constante revisión del desempeño, implementar en la organización acciones para el logro de los objetivos, así como verificar los avances y resultados de la gestión administrativa y dar seguimiento continuo en el contexto de mejora continua [2]; esto se puede lograr mediante el uso de un Sistema de Gestión de Energía (SGEn). El propósito de un SGEn es establecer los métodos y procesos necesarios para mejorar el rendimiento

energético, incluyendo la eficiencia, uso y consumo [3]. También, la aplicación del sistema tiene la finalidad de conducir a reducciones en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), el costo de la EnE, y otros impactos ambientales relacionados.

Según Escrivá (2011) [4], como primeros pasos hacia la identificación de acciones para mejorar el uso de EnE, se debe caracterizar y cuantificar el comportamiento energético. Se requiere pues lógicamente, la necesidad de conocer y entender cuál es el papel que juega el uso de EnE dentro de un proceso productivo. Cabe mencionar el famoso lema de William Thomson que dice *“Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre”*. En este contexto, los Sistemas de Medición y Monitoreo (SMM) suelen ser utilizados para conocer los valores y rangos en los que nuestro sistema opera [5]. La inclusión de estos equipos puede resultar en una mejor forma de aprovechar la EnE disponible, modificar las características fundamentales de las curvas de demanda y revelar oportunidades [2].

Las metodologías que se presentan en este documento fueron desarrolladas para facilitar las actividades concernientes a un SGen. Están compuestas por un SMM y un modelo de diagnóstico; el primero, conforma la parte innovadora de las metodologías y es en esencia una herramienta de monitoreo en tiempo real que cuenta con una serie de ventajas técnicas y económicas frente a otros similares en el mercado; el segundo, es una guía de procesamiento y análisis de la información de sencilla elaboración cuya finalidad es la evaluación del uso de la EnE. Ambos, fueron desarrollados con el apoyo de especialistas en el ramo y actores involucrados en el uso de la EnE, como son: empleados y administradores de empresas e instituciones que fueron seleccionadas como casos de estudio.

## 1.1 USUARIOS DE ALTO CONSUMO

En México, los usuarios del servicio eléctrico según el Sistema de Información Energética (SIE) registrados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) son de 42, 148, 053 hasta noviembre del 2017 [6]. Con datos de este organismo, la cantidad porcentual y consumo de EnE promedio por tipo de usuario se muestra en las Figuras 1 y 2.

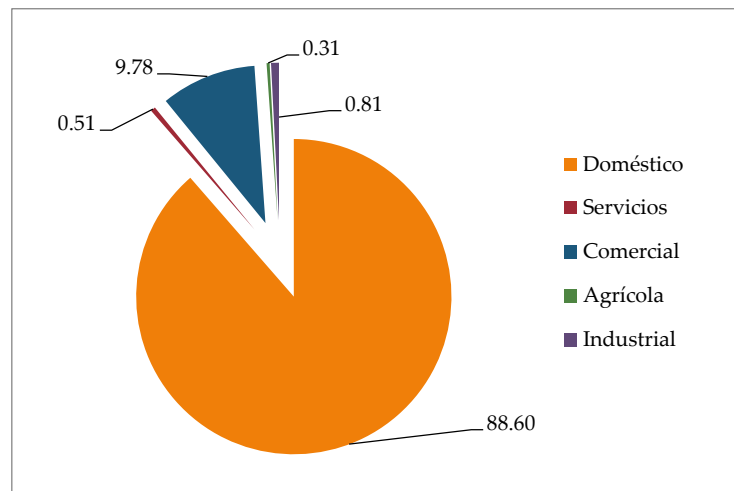


Figura 1. Porcentaje de usuarios dentro de las tarifas de CFE. Fuente: elaboración propia con datos de SIE [7].

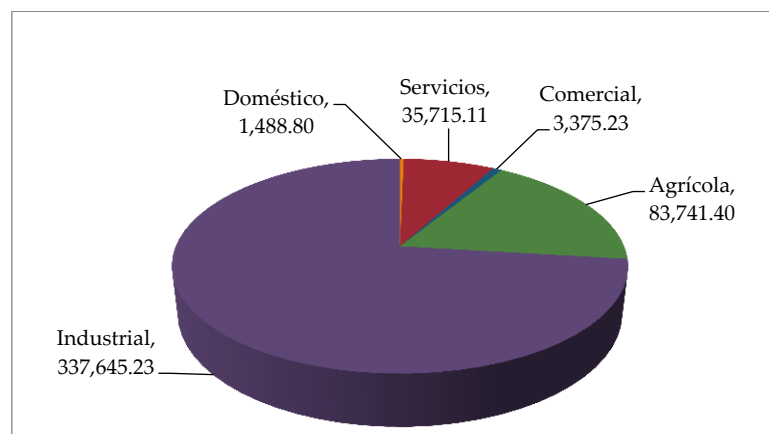


Figura 2. Consumo promedio mensual de EnE por usuario de cada sector en el 2017 (kWh). Fuente: elaboración propia con datos de SIE [8].

Analizando las Figuras 1 y 2, se puede observar un panorama inicial sobre el comportamiento del uso de la EnE de acuerdo al giro en el que se desenvuelve cada sector. La mayor cantidad de usuarios están registrados como domésticos pero presentan el menor índice de consumo mensual. Por otra parte, el nivel de consumo agrícola es muy elevado con un segundo lugar a nivel nacional pero, este sólo representa el 0.31% de la totalidad de usuarios. Por último, el sector servicios se posiciona en el tercer lugar de consumo pero con sólo el 0.51% de usuarios. Aquí, los contratos de servicio eléctrico están dedicados al alumbrado y el bombeo de agua potable y aguas negras correspondientes al servicio público.

El comportamiento del usuario con respecto al uso de la EnE se verá reflejado en el pago de la factura del servicio eléctrico. En la Figura 3, se presenta el precio medio anual por kWh que se registró para cada sector durante el 2017.

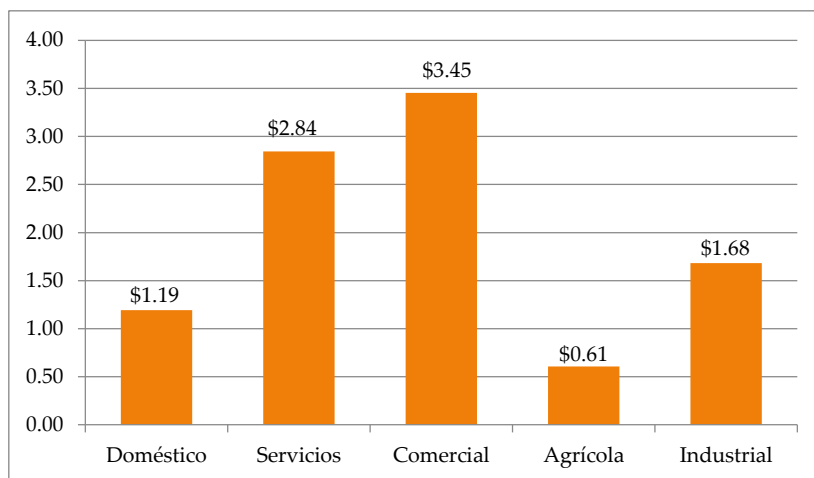


Figura 3. Precios medios anuales de energía eléctrica por sector. Fuente: elaboración propia con datos de SIE [9].

De la Figura 3, el sector comercial lidera el primer puesto con el mayor precio de EnE. En segundo lugar, se impone el precio correspondiente a servicios (alumbrado y bombeo de agua público). Por el contrario, el precio de EnE para el

uso agrícola es muy bajo; esto es debido al subsidio otorgado por el gobierno federal. Cabe mencionar, que el monto y asignación de subsidios es variable e impacta de manera muy importante al precio final de la EnE en todos los sectores. Para empresas e instituciones ubicadas en los sectores comercial, industrial y de servicios, el precio medio es muy elevado pudiendo llegar a ser hasta un 82.31% mayor comparado con el residencial y el agrícola.

Adicionalmente, durante los últimos años se ha presentado una importante variación de precios en los distintos sectores. En la Figura 4, se puede observar el histórico entre los años 2010 y 2017.

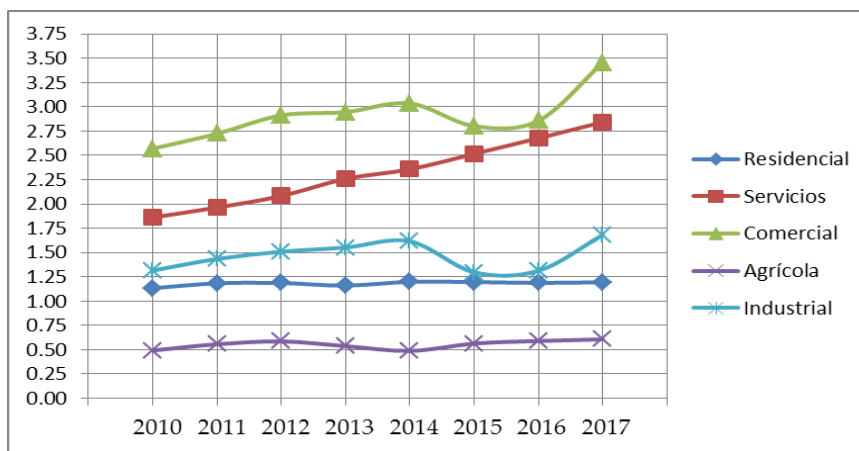


Figura 4. Escalamiento de precios de la electricidad por sector tarifario. Fuente: elaboración propia con datos de SIE [9].

Como se puede observar en la Figura 4, el precio se ha mantenido casi estable para el sector residencial y agrícola con muy pocas variaciones. Para el caso de los servicios, este se ha incrementado de forma casi lineal; el incremento total del 2010 al 2017 es de aproximadamente \$1.00 MXN, equivalente al 57.14%. En 2015, se observa una importante disminución del precio en los sectores comercial e industrial pero, retoman el incremento con una alza del 21.42% y 13.33% en lo que

fue del 2016 al 2017. Se puede inferir que el precio de la EnE en estos dos últimos sectores fue subsidiado significativamente sólo durante los años 2014 y 2015.

Con base en el análisis de los datos anteriores, se sustenta la selección de empresas e instituciones que se ubican dentro de los sectores comercial, industrial y de servicios como los sujetos de estudio. Además, en estos rubros la EnE es un recurso de alto valor ya que es utilizado en gran medida para el desarrollo de las actividades cotidianas productivas como pueden ser: la manufactura de productos y/o la prestación de servicios. Partiendo de esto, podemos inferir que una mala administración de la EnE puede ocasionar altos costos conformando de esta manera parte significativa de los egresos y una huella de carbono importante. Estos impactos se pueden relacionar con la cantidad de productos y servicios otorgados.

Para una empresa o institución, el propósito es la reducción del consumo de EnE manteniendo o mejorando las actividades productivas. Por lo tanto, la preocupación ya no puede limitarse a contar con un servicio de EnE ininterrumpido sino en utilizar este recurso con un mejor aprovechamiento. Con ello, se busca el beneficio económico, ambiental e inclusive el reconocimiento social.

## **1.2 ANTECEDENTES**

Desde hace décadas y hasta el día de hoy, el resultado de diversos trabajos de investigación alrededor del mundo han dirigido sus esfuerzos hacia el desarrollo de nuevas herramientas y métodos para los SGEN.

En el mercado, se pueden hallar una amplia variedad de productos y servicios para su compra o contratación, respectivamente. Los primeros se comercializan popularmente como sistemas de monitoreo y control para la

Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA por sus siglas en inglés) y lo segundos, en forma de consultoría y desarrollo otorgados por especialistas en el ramo.

### **1.2.1 Gestión energética en edificios**

Diversos investigadores han desarrollado metodologías de SGen (también conocidos como EMS por sus siglas en inglés) generalmente aplicadas al control activo de la comodidad (HVAC), la iluminación y la calidad del aire. Por ejemplo, Marinakis et al. (2013) [10] presentó una herramienta de automatización y control para el monitoreo remoto y en tiempo real del consumo de EnE. En este trabajo los autores desarrollaron una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI por sus siglas en inglés) que se presenta al usuario por medio de una aplicación de software. Dicha aplicación trabajaría principalmente con equipo de medición y de cómputo para proporcionar la capacidad de recibir, almacenar y mostrar el consumo de EnE, voltaje, corriente, potencia activa/reactiva, factor de potencia y frecuencia. Sharmin et al. (2014) [11] desarrollaron una herramienta de monitoreo en tiempo real basada en la utilización de sensores para el seguimiento de consumo de EnE, el rendimiento térmico y la calidad del aire. En este trabajo, se utilizó una computadora con un servidor de base de datos para permitir al usuario el acceso remoto de los resultados a través de Internet. Lo interesante de este estudio radica en la cuantificación del rendimiento energético del edificio mediante un análisis holístico de los diferentes componentes de las mediciones; esto para determinar los factores que tienen una mayor influencia. Haidar et al. (2017) [12] propusieron un sistema de administración de EnE dependiente del consumidor denominado Consumer Dependent Energy Management System (CD-EMS) para reducir el costo de la EnE y la huella de carbono. La ventaja de esta solución es el cálculo de la proporción óptima de uso de EnE y su disponibilidad utilizando diferentes

fuentes/proveedores que son renovables o no renovables. Con este fin, se desarrolló una GUI en Matlab para presentar resultados numéricos y gráficos tales como: disponibilidad, precio y emisiones de CO<sub>2eq</sub>. Farrokhifar et al. (2018) [13] desarrollaron un sistema inteligente de administración para reducir la facturación del servicio eléctrico. Para ello, emplearon un enfoque de optimización mediante la programación de dispositivos inteligentes utilizando un modelo basado en los precios con una alta prevención de la demanda máxima. El uso del software llamado GAMS se usó para resolver el modelo matemático del problema. Gökçe y Gökçe (2013) [14] presentaron la arquitectura de un sistema holístico para la operación de la edificación utilizando indicadores de eficiencia energética. En este trabajo, se desarrolló una GUI amigable utilizando la plataforma de programación Java para proporcionar la información de rendimiento del edificio.

Por otro lado, en el mercado nacional se puede encontrar una cantidad moderada de empresas que se dedican a la consultoría y desarrollo de las actividades concernientes a la gestión energética, entre ellas las siguientes (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Proveedores de SGen para la evaluación del uso de EnE en edificaciones.

Fuente: elaboración propia.

Empresa	Descripción	
	Producto	Servicio
<b>Schneider</b>	Medidores multifunción y calidad energética PowerLogic Medidores de Energía Acti9 Software power monitoring expert Software power SCADA operation	Energía y sostenibilidad Distribución eléctrica Automatización industrial
<b>Circuitor</b>	Analizadores de redes CVM Equipo de control EDS Software de gestión energética PowerStudio y PowerVision	Desarrollo de proyectos de investigación

<b>ABB</b>	Sistema de monitoreo de circuitos CMS Medidores de electricidad EQ Analizadores de calidad de la EnE EQmatic Instrumentos de medida modulares M2M	Soluciones para la eficiencia energética
<b>Kotkoff</b>	Sistema de monitoreo Blovius Medidor Phoenix contact y Energyza Sistemas PLC y SCADA	Monitoreo y automatización de instalaciones eléctricas
<b>Micromático</b>	Equipo de medición Micromático Plataforma SCADA	Optimización de consumo de EnE
	-	Auditorías energéticas
<b>ECCm</b>	-	Proyectos de
<b>México</b>	-	sustentabilidad

De la lista de proveedores que se muestran en la Tabla 1 y con base en cotizaciones regionales, se enfatiza un precio de venta alto en el rango de \$90,000.00 a los \$150,000.00 MXN. El costo de la inversión obtenido incluye el equipamiento necesario para la adquisición e implementación de un sistema SCADA o similar en un edificio mediano. En adición, el costo que conlleva la consultoría y desarrollo de una auditoría energética puede ser del 30 a un 50%.

### 1.2.2 Gestión energética en bombas

Sabogal et al. (2013) [15] desarrollaron un programa de Excel que realiza el cálculo de la curva de carga de todo el sistema, la eficiencia, el conjunto motor variador y el control del motor o arrancador. La desventaja de utilizar dicho programa es que trabaja con una entrada manual de valores y esto puede incurrir en la generación de errores por factor humano y baja precisión en la obtención de resultados debido al tiempo entre recolección y procesamiento. Sunela y Puust (2014) [16] desarrollaron una herramienta de cálculo que permite determinar la combinación óptima de bombas. Esta herramienta está basada el lenguaje de programación Java, las librerías JFreeChart y el servidor web de Apache.

Básicamente, la herramienta es una aplicación de software que procesa los cálculos correspondientes de rendimiento y eficiencia. La ventaja de este sistema es que el usuario puede acceder a los resultados de forma remota a través de internet. Quezada et al. [17] desarrollaron un sistema de monitoreo y control basado en HMI-PLC para la gestión del agua. Este estudio se caracteriza por la utilización de una GUI que muestra virtualmente el funcionamiento de los componentes del sistema y el valor de las mediciones durante el proceso de bombeo. Kaya et al. [18] analizaron oportunidades de ahorro de EnE calculando la carga y la eficiencia operativa de los motores. En este estudio los autores implementaron un análisis sencillo para cuantificar los ahorros económicos anuales con relación a la sustitución de bombas ineficientes. En adición, muchos trabajos de investigación han utilizado los recursos de software gratuitos como son la herramienta de evaluación de sistemas de bombeo conocido como Pumping System Assessment Tool (PSAT) y el modelo de mejora del sistema de bombeo conocido como Pump System Improvement Modeling tool (PSIM) para calcular la eficiencia, los ahorros potenciales y la posible reducción de emisiones de GEI [19].

Finalmente, en el mercado nacional se pueden encontrar algunos productos y servicios ofrecidos por empresas nacionales e internacionales como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Proveedores de SGEN para la evaluación del uso de EnE en sistemas de bombeo. Fuente: elaboración propia.

Empresa	Descripción	
	Producto	Servicio
ABB	Herramienta para el monitoreo y control remoto Ability Smart Sensor Software para el monitoreo de eficiencia en bombas	Ingeniería y consultoría para la automatización de sistemas de bombeo

PEMS		
<b>Schneider</b>	Software EcoStruxure Controladores y adquirentes de datos Foxboro Controladores Modicon	Automatización, control y gestión de la planta de bombeo
<b>DTI</b>	Asset Vission Equipo de medición ABB, Armstrong, WIKA y GE.	Servicio industrial de instrumentación
<b>Instrumentación y control aplicada</b>	Sistemas supervisores SCADA	Desarrollo tecnológico en ingeniería de software
<b>iPROSER</b>	MJK Software HMI	Automatización de procesos industriales
<b>besco</b>	-	Monitoreo enfocado al ahorro de energía

De la lista de proveedores que se muestran en la Tabla 2, se estima que el precio de venta del equipo necesario para la instrumentación de una bomba de acuerdo a las características y requerimientos de una planta dedicada exclusivamente al bombeo de agua se encuentra en el rango de \$150,000.00 a \$200,000.00 MXN. Además, el costo que conlleva la consultoría y desarrollo de una auditoría energética se estima puede ser del 15 al 30% adicional.

### 1.3 IMPORTANCIA DEL TRABAJO

En este documento se propone el uso de un SGen para hacer frente al encarecimiento progresivo de la EnE y al incremento de la contaminación ambiental. Sin un SGen, una empresa o institución puede estar pagando periódicamente un costo adicional de EnE, el cual se acumulará con el tiempo y eventualmente generará un egreso anual importante. Además, el medio ambiente se verá afectado debido al consumo acumulativo de este recurso que genera emisiones de GEI.

Como resultado de la revisión bibliográfica y de mercado, se determinó que todas las opciones analizadas presentan en cierta medida algún inconveniente técnico y/o económico para los empleados y administradores que buscan los beneficios de la gestión de la EnE. Entre las desventajas más importantes, se encuentran las siguientes:

1. Precios de mercado muy elevados para herramientas de medición y control, así como de, los servicios de desarrollo y consultoría ofrecidos por personal especialista externo.
2. Herramientas difíciles de utilizar y con características técnicas limitadas.
3. Métodos de análisis de compleja implementación.
4. Contrariamente, métodos de análisis muy básicos y simples que suelen tomar más tiempo y donde la confianza en la precisión y la exactitud es a menudo una preocupación.

Como punto adicional, se debe hacer hincapié en 2 asuntos importantes. El primero, se refiere a que la mayoría de los proyectos de SGEN se enfocan en optimizar las operaciones directamente con el uso de controles automáticos y suelen descuidar parámetros importantes como pueden ser el desbalance de corrientes, las caídas de voltaje y el costo de la EnE. El segundo asunto, se refiere a que las empresas proveedoras del producto y/o servicio en ocasiones no cuentan con infraestructura física para la atención a clientes en la región o inclusive en el país. En este escenario, es evidente que la comunicación y el cumplimiento de garantías pueden verse afectados. Por lo tanto, la mayoría de los productos y servicios ofertados cuentan con uno o más inconvenientes que pueden perjudicar de manera importante la viabilidad del proyecto de ahorro de EnE y por ende, el interés del cliente potencial.

Este estudio presenta la solución a la problemática antes expuesta mediante el desarrollo de metodologías innovadoras, prácticas y de bajo costo para la evaluación del uso de la EnE. El propósito es poner a disposición herramientas de SGen cuya rentabilidad propicie la generación de proyectos de ahorro y uso eficiente de la EnE. Además, se desarrollaron metodologías que pueden ser utilizadas por cualquier empleado o administrador. En conjunto, todo esto puede ser la clave para llamar la atención de empresas e instituciones además de ser útiles para la obtención de fondos y financiamientos en México o en el exterior. Además, la sociedad en general también se verá beneficiada por que la contaminación ambiental podrá verse disminuida de manera significativa.

Finalmente, el propósito personal del autor de esta tesis es construir las bases para el posterior desarrollo de sistemas inteligentes que contarán con las mismas cualidades de innovación, practicidad y bajo costo.

### **1.3.1 Instrumentación virtual como estrategia**

Es imprescindible la utilización de tecnología en las empresas e instituciones pues la instrumentación de los procesos ha sido incluyente en la modernización. Como referencia, la instrumentación es la acción de equipar una máquina, circuito o sistema mediante aparatos de medición y/o control manual y/o autónomo y que suelen ser instalados de forma permanente.

Adicionalmente, la evolución de la tecnología ha facilitado el acceso a nuevos sistemas de microprocesamiento y cómputo que cuentan con mayores atributos para el análisis contra la instrumentación tradicional puramente neumática e hidráulica, por lo que, ésta se ha ido sustituyendo gradualmente por la instrumentación digital.

Hoy en día, compañías aeroespaciales internacionales como Boeing [20] e importantes agencias gubernamentales como NASA [21] usan la plataforma de programación de sistemas de LabVIEW® para crear instrumentos digitales de mayor flexibilidad, escalabilidad y a un menor costo [22]; estos son llamados Instrumentos Virtuales (VI's por sus siglas en Inglés). Un VI está conformado comúnmente por una aplicación de software que realiza la orquestación entre diferentes tecnologías convencionales, como son: una computadora, equipo de medición y/o control seleccionado a la medida y dispositivos que permiten la transmisión de datos. Todos estos elementos trabajan sinérgicamente para convertir a la computadora en el instrumento ideal para fines prácticos.

Según Ramos et al. (2013) [23], el desarrollo de VI's se ha incrementado debido a su rapidez de construcción y a su capacidad de satisfacer los requisitos específicos del usuario. Según Pineda (2013) [24], la instrumentación virtual ha tenido un crecimiento exponencial en áreas tecnológicamente a la vanguardia y continuará su progresión hacia horizontes poco imaginables. Debido a esto, se usa con frecuencia en el campo de la investigación y especialmente en ingeniería por que los VI's ofrecen la capacidad de combinar tecnologías convencionales y emergentes.

La innovación que presenta este trabajo de investigación se basa en la creación de herramientas de monitoreo con la tecnología de instrumentación virtual, por lo tanto, son VI's desarrollados en LabVIEW® que toman ventaja de las prestaciones ofrecidas por dicha tecnología. Además, se sustenta en el desarrollo de VI's capaces de resolver problemas específicos debido a las características especiales que los conforman.

## 1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

El trabajo de investigación presenta nuevas metodologías desarrolladas para la evaluación del uso de la EnE. Están dirigidas a empresas e instituciones dentro de los sectores comercial, industrial y de servicios de acuerdo a la clasificación de CFE. Por lo tanto, en primera instancia se ha excluido a otros tipos de energía como la obtenida a través de combustibles y, en segunda instancia a los sectores residencial y agrícola.

Se hace conciencia sobre la cantidad y características de las metodologías desarrolladas en relación al tiempo destinado para la investigación. Los usuarios seleccionados se clasifican de acuerdo a una amplia gama de tarifas eléctricas y suelen utilizar la EnE de forma muy distinta, que comúnmente se relaciona al giro. Por lo tanto y debido al hecho de utilizar instrumentación virtual como método de innovación para resolver problemas específicos, se sugiere la creación de metodologías distintas en cierta medida para satisfacer los requerimientos de cada usuario.

En concreto, se desarrollaron y validaron 2 metodologías, compuestas cada una por una herramienta de monitoreo y un modelo de diagnóstico. Cada metodología está diseñada para su respectivo tipo de usuario. El propósito fue seleccionar 2 escenarios donde el uso y consumo de la EnE fueran elevados pero a su vez distinto; con ello, se buscó abarcar el desarrollo de funciones de monitoreo y procedimientos de análisis diferentes.

El primer caso de estudio contempló a los edificios del sector comercial e industrial ya que a nivel mundial pueden usar hasta el 40% de la EnE y contribuir hasta el 30% de las emisiones anuales de GEI [25]. Además en México, los edificios pueden representar hasta el 25% del consumo total de electricidad y el 20% de las

emisiones de CO<sub>2eq</sub>, debajo de los Estados Unidos con el 68% y el 38%, respectivamente [26].

El segundo caso de estudio contempla a los usuarios del sector servicios cuya mayor carga eléctrica son los sistemas de bombeo. En el mundo, estos sistemas consumen casi el 20% de la energía en motores eléctricos y entre el 25% y el 50% del consumo total de electricidad en ciertas instalaciones industriales [27]. En México, estos sistemas pueden alcanzar un 6.5% del consumo nacional [28] y hasta un 95% en las plantas de tratamiento de agua [29]. Además, se estima que el 75% de esos sistemas de bombeo están sobredimensionados por contingencia, muchos en más del 20% [27].

La operación de bombas ineficientes puede resultar en enormes costos operativos y una importante huella de carbono asociada con el consumo. Por lo tanto, la mejora de su eficiencia operativa sugiere una excelente oportunidad de ahorro y de protección al medio ambiente.

## 1.5 HIPÓTESIS

1. Se pueden crear metodologías más prácticas y de bajo costo capaces de abatir las actuales propuestas en el mercado regional y nacional y, que son dirigidas a los sectores comercial, industrial y de servicios.
2. Usando LabVIEW® se pueden crear herramientas de monitoreo innovadoras y capaces de adaptarse a diferentes aplicaciones con la finalidad de satisfacer las necesidades específicas que pueda presentar cada usuario.
3. Se pueden optimizar los modelos de diagnóstico convencionales utilizados para evaluar el uso de la EnE. Esto, con la finalidad de que operadores y administradores sean capaces de fungir como gestores sin la necesidad de contratar personal especializado.

## 1.6 OBJETIVOS Y META

General:

Desarrollar metodologías dirigidas a los SGEN que permitan abatir los inconvenientes técnicos y económicos que presentan las actuales propuestas en el mercado regional y nacional.

Específicos:

1. Desarrollar herramientas de monitoreo de uso más práctico:

- a. De fácil instalación, uso y desinstalación.
- b. Que presenten la información de una forma amigable con el usuario.
- c. Que faciliten la recolección de datos por medio del acceso remoto de la información vía inalámbrica y/o por medio de internet.
- d. Que presenten los resultados con suficiente grado de precisión y exactitud.

2. Desarrollar herramientas de monitoreo de menor costo:

- a) Que generen un ahorro sustancial en la inversión inicial y subsecuente.

3. Desarrollar modelos de diagnóstico:

- a. Sencillos de implementar por empleados y administradores de la empresa o institución.
- b. Que permitan conocer el impacto económico y ambiental debido al uso cotidiano de la EnE y con ello, la capacidad de proyectar los beneficios de la implementación de medidas de ahorro y uso eficiente.

Meta:

Otorgar solución a la actual problemática presentada mediante el desarrollo de nuevos SGen.

## CAPÍTULO 2: METODOLOGÍAS

---

Se desarrollaron 2 nuevas metodologías para la evaluación del uso de la EnE. Las metodologías están compuestas por una herramienta de monitoreo y un modelo de diagnóstico. Ambas metodologías fueron diseñadas por y para empleados y administradores; esto con la finalidad de ser “amigables con el usuario”. Con ello, se pretende que los actores involucrados en el uso de la EnE tengan la capacidad de fungir como gestores. También, se pretende omitir el costo adicional que conlleva la contratación de personal externo especialista.

Las herramientas de monitoreo conforman la parte innovadora de las metodologías. Se desarrollaron 2 VI's en LabVIEW<sup>®</sup> denominados como Sistema de Ahorro Remoto (SisAR) y Monitor de Parámetros de Bombas (MPB). SisAR y MPB proporcionan datos de campo en tiempo real cuya finalidad es la caracterización del comportamiento del uso de la EnE. Su implementación provee datos de alta confiabilidad que sirven como sustento en la toma de decisiones.

SisAR y MPB trabajan con diversos elementos de interfaz de hardware y software orquestados para realizar las funciones del monitoreo en tiempo real. Su diseño involucró las siguientes etapas tal y como se ilustra en la Figura 5.



Figura 5. Etapas principales de diseño de SisAr y MPB. Fuente: elaboración propia.

De la Figura 5, las tareas de monitoreo se realizan de forma cíclica y de forma indefinida hasta que el usuario intervenga en su detención. En la sección 1, las señales físicas se componen de los parámetros de interés que son medidos en campo. Estas señales se adquieren por medio de dispositivos de medición comerciales que fueron seleccionados para mantener la exactitud de las lecturas dentro del 3%, lo cual, es suficiente para el estudio. En la sección 2, el resultado de las lecturas son posteriormente transmitidas de forma alámbrica o inalámbrica hacia la etapa de procesamiento. La tecnología utilizada para el envío y recepción inalámbrica de datos se puede elegir entre 2 opciones: la Radio Frecuencia (RF) y/o la arquitectura de información distribuida por internet. Su elección dependerá de la distribución espacial de los elementos de medición y procesamiento, así como el requerimiento del usuario. Por último, las secciones 3, 4 y 5 involucran el uso de una computadora equipada con el VI el cual fue desarrollado en la plataforma de programación de LabVIEW®. SisAR y MPB se presentan ante el usuario por medio de una aplicación de software que funge como la GUI. Dicha aplicación muestra

los resultados y funciones del monitoreo de una forma amigable con el usuario por medio de indicadores numéricos e ilustraciones gráficas.

Por su parte, los modelos de diagnóstico para la evaluación del uso de la EnE están basados en métodos de análisis convencionales que fueron optimizados para que puedan ser elaborados por empleados y administradores. Son guías para el procesamiento y análisis de la información que relaciona los resultados del monitoreo con la información concerniente a las operaciones productivas. Este segundo aglomerado de datos se obtiene principalmente de entrevistas a los actores involucrados en el uso de la EnE y, se complementa con los datos provenientes de las principales cargas eléctricas (o aparatos eléctricos).

Finalmente, la evaluación del uso de la EnE tiene como objetivo la determinación de los factores, causas y consecuencias que con mayor significancia impactan la utilización de este recurso en el proceso productivo de una empresa o institución. Su implementación eficaz permite cuantificar impactos económicos y ambientales que conlleva la línea actual de operación. Con ello, se puede evaluar el efecto de acciones y estrategias que mejoren la eficiencia energética.

## **2.1 SISTEMA DE AHORRO REMOTO (SISAR)**

Es una herramienta de monitoreo en tiempo real desarrollada para proporcionar la información requerida con la finalidad de evaluar el uso de la EnE. En su primera versión, SisAR está dirigido al SGen en edificios pequeños y medianos dentro de la tarifa HM de acuerdo al esquema de cobro de CFE. Además, está diseñado para un suministro eléctrico igual o menor a los 660 V con corrientes de fase de hasta 2000 A.

SisAR proporciona información sobre los parámetros eléctricos, el perfil horario de potencia, el costo de la EnE y huella de carbono asociada con el consumo. Los parámetros eléctricos constan de los siguientes datos: voltaje, amperaje, factor de potencia, potencia activa y energía consumida. La principal cualidad de SisAr es la presentación en tiempo real del cargo de facturación actual y su proyección mensual. SisAR realiza el cálculo de estos cargos de acuerdo a la metodología que publica CFE en su sitio web. Además, muestra el desglose del costo de facturación de acuerdo con lo siguiente: cargo por demanda, el cargo o bonificación por factor de potencia y el cargo por consumo de energía.

Adicionalmente, SisAR ofrece al usuario un servicio web de información distribuida a través de internet. Con ello, el usuario tiene la opción de visualizar e interactuar con la aplicación de software de monitoreo desde la computadora local o desde otra computadora remota conectada a internet. En el escenario de acceso remoto, la segunda computadora puede estar ubicada en cualquier región del país e inclusive del mundo y, el usuario podrá tener acceso a la plataforma en línea si cuenta con los permisos adecuados.

### **2.1.1 Materiales y métodos**

Como se ha mencionado, SisAR es una herramienta de monitoreo que trabaja con elementos de hardware y software. La sección de hardware se compone a su vez de: equipo de medición eléctrica, instrumentos para la transmisión/recepción de datos y una computadora.

Primero, en la Figura 6 se ilustra el equipo de medición eléctrica y en la Tabla 1 se describen sus características principales.

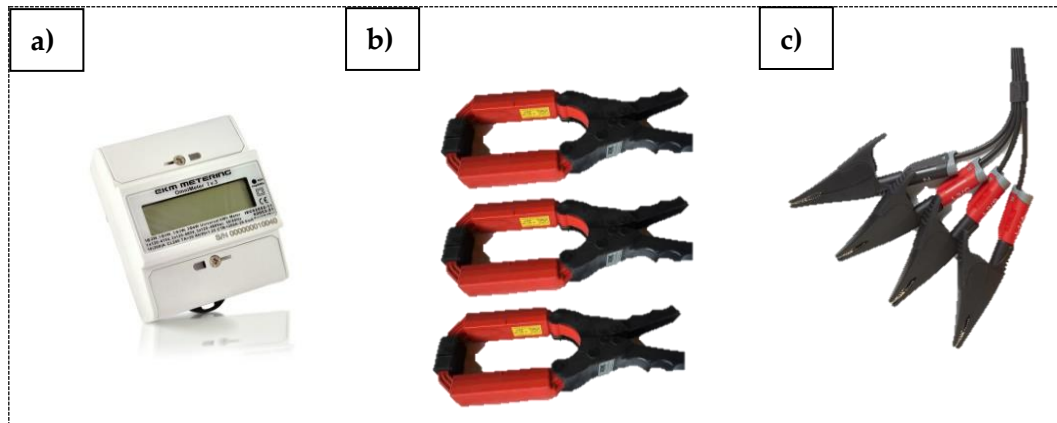


Figura 6. Componentes del equipo de medición eléctrica utilizado por SisAR: a) Medidor eléctrico, b) Transformadores de corriente y c) Conectores tipo cocodrilo.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Características del equipo de medición eléctrica utilizado por SisAR.

Fuente: elaboración propia.

Componente	Marca	Modelo	Especificaciones	Exactitud
Medidor eléctrico	EKM metering	Omnimeter I v.3	120 V a 480 V, 50/60 Hz, hasta 5000 Amperes	$\pm 1\%$
Transformador de corriente (TC)	AEMC	D14	2000 A, hasta 600 V Salida de 0.5 mV/1 A	$\pm 1\%$
Conector tipo cocodrilo	Genérico	Genérico	Hasta 600 V	-

El equipo de medición eléctrica que utiliza SisAR fue seleccionado para evitar el corte de energía eléctrica del edificio cuando sus accesorios (transformadores de corriente y conectores tipo cocodrilo) sean instalados. Esta condición podrá aplicarse en centros de carga que estén alimentados en baja tensión (<1000 V). Los transformadores de corriente (TC's) que utiliza este equipo medición son del tipo de núcleo partido, por lo que, están diseñados para abrirse y colocarse alrededor del conductor eléctrico; de esta manera, se omite la

desconexión. Cabe mencionar que los TC's utilizados por SisAR no son del fabricante del medidor eléctrico a razón de utilizar otros con mejores prestaciones. En concreto, se acondicionaron TC's de otro fabricante porque ofrecen una mejor maniobrabilidad durante su instalación a un menor costo.

Segundo, en la Figura 7 se ilustran los instrumentos de comunicación y en la Tabla 4 se describen sus características principales.

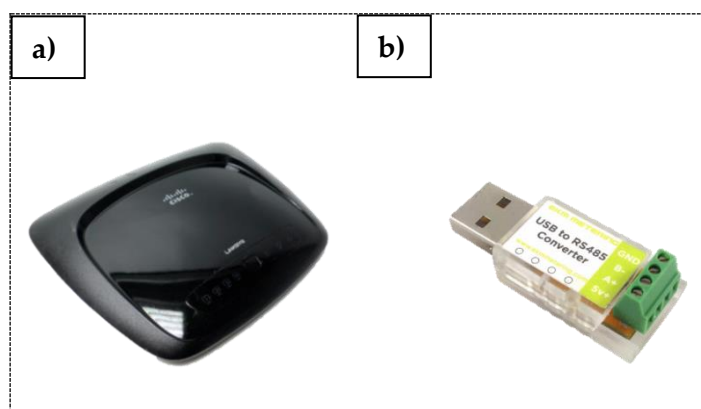


Figura 7. Instrumentos de comunicación utilizados por SisAR: a) Enrutador Wi-Fi y b) Convertidor USB a RS-485. Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Características de los instrumentos de comunicación utilizados por SisAR.

Fuente: elaboración propia.

Componente	Marca	Modelo	Especificaciones
<b>Enrutador Wi-Fi</b>	Cisco	WRT120N	Wi-Fi, 4 puertos Ethernet, 2 antenas internas a 16 dBm
<b>Convertidor USB a RS-485</b>	EKM metering	Blink	FTDI chip con máxima velocidad de 3,000,000 Baud

El convertidor USB a RS-485 es utilizado para transmitir los datos del equipo de medición eléctrica hacia la computadora de manera alámbrica; este método fue utilizado para evitar la pérdida de datos en mayor medida. Por su

parte, el enrutador es el dispositivo encargado de obtener la conexión a internet por cable del módem. Este dispositivo es utilizado para publicar la aplicación de software de SisAR en un sitio web.

Tercero, en la Figura 8 se ilustra la computadora utilizada y en la Tabla 5 se describen sus características principales.



Figura 8. Computadora utilizada por SisAR. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Características de la computadora utilizada por SisAR. Fuente: elaboración propia.

Componente	Marca	Modelo	Especificaciones
Computadora portátil tipo tableta	Armor	X7	Sistema operativo: Windows XP Capacidad: 40 GB, 2 GB RAM Procesador: Intel Atom N450 1.66 GHz Conectividad: Wi-Fi Temperatura de operación: -20 a 60 °C

Como se puede observar en la Figura 8, el dispositivo utilizado para el procesamiento, despliegue y registro de la información es una computadora portátil tipo tableta. La tableta Armor X7 fue seleccionada por su diseño compacto

y características especiales que la describen como “de uso rudo”; esto se debe al valor de la temperatura máxima a la cual puede operar. Dicha tableta puede operar en lugares donde las condiciones ambientales extremas no permiten utilizar una computadora convencional.

### **2.1.2 Aplicación de software**

Como se ha mencionado, SisAR es una herramienta de monitoreo que se compone de una interfaz GUI. La GUI se presenta como una aplicación de software que fue desarrollado en la plataforma de programación de LabVIEW 2013® para ser ejecutada en la plataforma Windows. En la Figura 9, se esquematizan sus funciones principales.

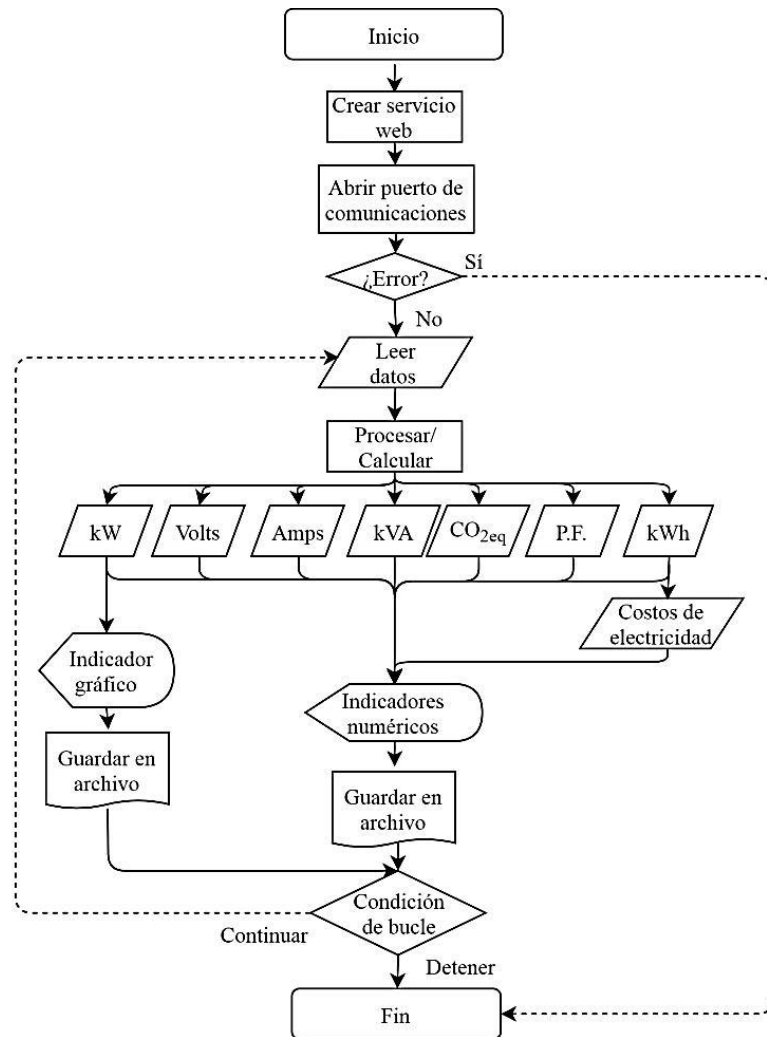


Figura 9. Esquema de operaciones de la aplicación de software de SisAR. Fuente: elaboración propia.

De la Figura 9, las lecturas de las mediciones son procesadas para la obtención de parámetros eléctricos, los costos de electricidad y el perfil de potencia. Posteriormente, los resultados se presentan en la pantalla de la computadora por medio de indicadores numéricos y un indicador gráfico para el perfil de potencia. A continuación, se muestra la descripción general de los bloques de programación que forman parte del VI desarrollado para la evaluación del uso de la EnE del edificio, desarrollado en LabVIEW 2013<sup>®</sup> (ver Figura 10).

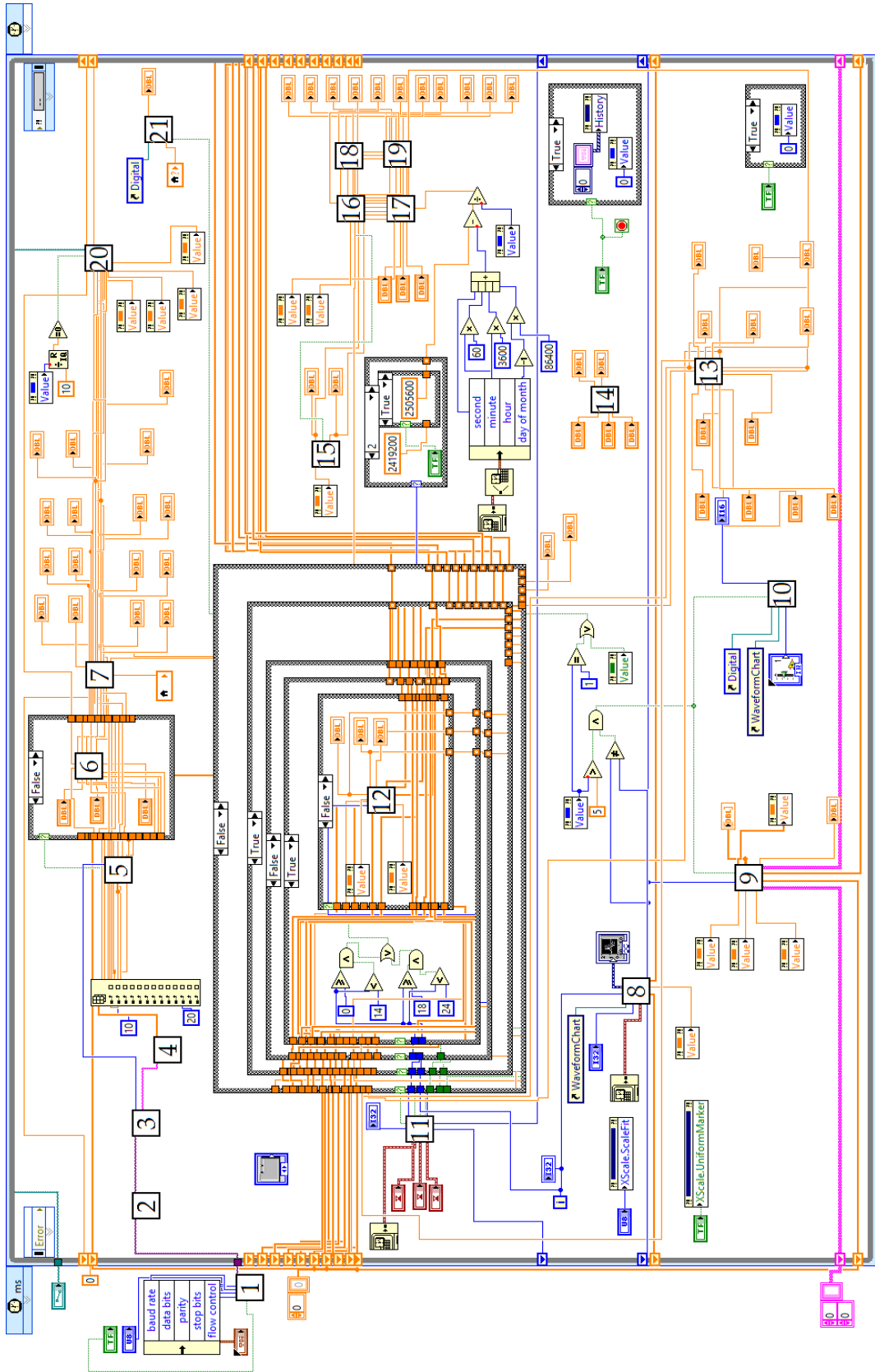


Figura 10. Diagrama de bloques del instrumento virtual de SisAR. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 10, la programación gráfica en LabVIEW® usa conexiones de iconos cableados en contraste con la programación basada en texto. Para la mayoría de los usuarios, incluidos los usuarios avanzados, es más fácil ver y leer la programación gráfica en comparación con la programación de texto [23]. Los bloques de programación de la Figura 10 se enumeran del 1 al 21 y se ejecutan continuamente dentro de una estructura de bucle con iteraciones realizadas cada segundo. A continuación, se describe cada uno de estos en la Tabla 6.

Tabla 6: Bloques de programación del instrumento virtual de SisAR. Fuente: elaboración propia.

<b>Bloque</b>	<b>Función</b>
1.	Apertura de Puerto de comunicación
2.	Petición de datos
3.	Lectura de respuesta
4.	Análisis de datos
5.	Filtrado de datos No. 1
6.	Filtrado de datos No. 2
7.	Filtrado de datos No. 3
8.	Generación de gráfico de demanda máxima
9.	Registro de máxima demanda
10.	Grabación del grafico de demanda máxima
11.	Tratamiento de datos según la fecha
12.	Registro de la demanda máxima rodante
13.	Cálculo del costo de EnE
14.	Cálculo de la huella de carbono
15.	Registro del factor de potencia
16.	Cálculo del costo de la demanda máxima
17.	Cálculo del costo del factor de potencia
18.	Cálculo del costo total actual de EnE
19.	Proyección del costo mensual de EnE

---

20.	Grabación de resultados
-----	-------------------------

---

21.	Detección del cambio de fecha
-----	-------------------------------

---

Una vez que SisAR se encuentra en ejecución, la aplicación de software publica en un sitio web la pantalla del monitoreo. A partir de ese momento, el usuario puede acceder e interactuar con la plataforma en línea usando un navegador web como puede ser internet Explorer. Además, las salidas numéricas y gráficas están programadas para ser grabadas continuamente en archivos separados y distribuidas a través de un servicio en la nube. En el capítulo siguiente se mostrarán las pantallas de la mencionada aplicación de software, ya que en dicha sección se desarrolla la implementación en campo.

### **2.1.3 Modelo de diagnóstico**

Es una guía que describe el procedimiento para el cálculo y manejo de la información requerida para la evaluación de la EnE en pequeños y medianos edificios de empresas e instituciones dentro del sector comercial, industrial y de servicios. El desarrollo de dicha guía fue basada en la norma de gestión de energía ISO 50001 para la obtención, procesamiento y análisis de la línea base e Indicadores Energéticos (IDEns) [30]. Los pasos de desarrollo de la guía propuesta se ilustran en la Figura 11.

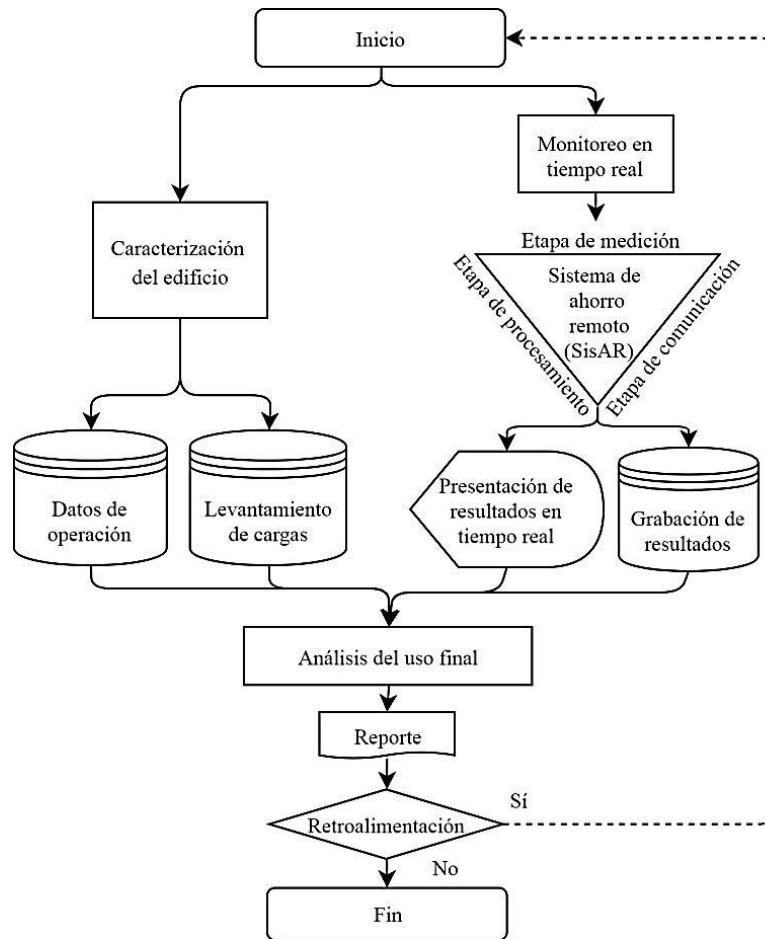


Figura 11. Esquema de operaciones para la evaluación del uso de la EnE en pequeños y medianos edificios. Fuente: elaboración propia.

De la Figura 11, se puede observar cómo los resultados del monitoreo son relacionados con la información obtenida de la caracterización del edificio. Los datos de operación son recolectados mediante encuestas y calculados mediante estimaciones de potencia. Por su parte, el levantamiento de cargas se refiere a la recolección de datos disponibles en las etiquetas de las cargas eléctricas en funcionamiento.

Finalmente, el análisis de uso final es un modelo de evaluación que profundiza sobre la forma en que se utiliza la EnE. Entre las variables de análisis más importantes se incluyen: instantes de encendido, frecuencias de uso,

magnitudes de consumo y patrones de consumo. Esta información es utilizada para el análisis de los parámetros eléctricos, los rendimientos y los costos de la EnE.

## **2.2 MONITOR DE PARÁMETROS DE BOMBAS (MPB)**

Es una herramienta de monitoreo en tiempo real que proporciona información sobre parámetros hidráulicos, eléctricos y de eficiencia como son: caudal volumétrico de agua, presión manométrica, potencia eléctrica, factor de fricción, carga dinámica total, potencia hidráulica, eficiencia electromecánica, eficiencia global. Además, MPB cuenta con la cualidad de generar las curvas Características de Operación (OC por sus siglas en inglés) que son utilizadas para conocer el comportamiento de una bomba durante su funcionamiento. Estos gráficos se construyen relacionando diferentes caudales con parámetros de operación como son: la carga total (TDH por sus siglas en inglés), la potencia al freno (BHP por sus siglas en inglés) y la eficiencia [31].

La primera versión de MPB está diseñada para su implementación en bombas verticales de hasta 400 hp cuya configuración eléctrica trifásica se encuentra a una baja tensión igual o menor a los 660 V y, a una corriente por fase de hasta 2000 A. En adición, MPB trabaja con equipo de medición dedicado a la adquisición de datos sobre flujo de agua que puede ser utilizado en condiciones de agua limpia y hasta ciertos tipos de aguas residuales y, en un rango de velocidad de 0.001 m/s hasta 64 m/s. Asimismo, la capacidad de medición de presión manométrica se encuentra en el rango de 0 psi hasta 80 psi. Finalmente, MPB utiliza módulos de transmisión y recepción inalámbrica con tecnología RF para realizar la lectura de las mediciones de forma telemétrica. El alcance de los módulos RF está limitado a una distancia de 80 m en interiores y hasta 300 m en exteriores.

### 3.2.2 Materiales y métodos

MPB es un VI compuesto básicamente por equipo de medición, instrumentos de comunicación y una computadora. El primero se compone a su vez de un medidor de parámetros eléctricos, un medidor de flujo de agua y un transductor de presión manométrica. MPB hace uso de un medidor de parámetros eléctricos de misma marca y modelo al utilizado por SisAR (ver Figura 6). Por lo tanto, en la Figura 12 y en la Tabla 7, sólo se ilustran y describen los últimos dos componentes, respectivamente.



Figura 12. a) Equipo de medición de flujo de agua y b) Transductor de presión manométrica. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Características del medidor de flujo de agua y de presión utilizados por MBP. Fuente: elaboración propia.

Componente	Marca	Modelo	Especificaciones	Exactitud
Equipo de medición de flujo de agua	Siemens	FUS1010	Rango de medición de $\pm 12$ m/s y para tuberías de DN 6 hasta DN 9140	$\pm 1\%$
Transductor de presión manométrica	Genérico	80 PSI	0-80 PSI a un rango de temperatura de operación de -20 °C hasta 125 °C	$\pm 1.5\%$

El equipo de medición de flujo de agua utiliza sensores basados en la tecnología de ultrasonido. Por lo tanto, su colocación se dispone sobre la superficie de la tubería. Con ello, se evita el corte del suministro de agua durante la instalación. Por su parte, el transductor de presión puede sustituir al manómetro análogo que comúnmente se encuentra instalado en la tubería, ambos pueden mantenerse simultáneamente.

El equipo de comunicación que utiliza MBP para la transmisión y recepción de datos se ilustra y describe en la Figura 13 y la Tabla 8, respectivamente.

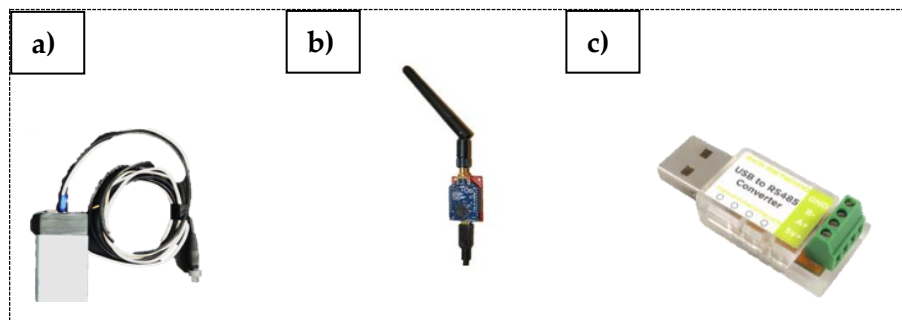


Figura 13. Instrumentos de comunicación utilizados por MPB: a) Transmisor RF, b) Receptor RF y c) Convertidor USB a RS-485. Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Características de los instrumentos de comunicación utilizados por MPB.

Fuente: elaboración propia.

Componente	Marca	Modelo	Especificaciones
Módulo transmisor RF	Desarrollo propio	TRF	2 canales de entrada analógicos dedicados a flujo de agua y presión manométrica. Transmisión de datos hasta 90 m en interiores y hasta 300 m en el exterior.
Módulo receptor RF	Xbee	Pro	Hasta 80 m en interiores y hasta 750 m en el exterior
Convertidor USB a RS-485	EKM metering	Blink	FTDI chip con máxima velocidad de 3,000,000 Baudios

Las lecturas de las mediciones (flujo, presión y parámetros eléctricos) pueden ser conjuntadas por el módulo transmisor RF para su posterior empaquetamiento y envío hacia la computadora. La fabricación de este módulo fue realizada por el autor de esta tesis. Su construcción involucra la combinación de una tarjeta de adquisición de datos con un módulo RF.

La computadora utilizada por MPB se muestra en la Figura 14 y en la Tabla 9 se describen sus características principales.



Figura 14. Computadora utilizada por MPB. Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Características de la computadora utilizada por MPB. Fuente: elaboración propia.

Componente	Marca	Modelo	Especificaciones
Computadora de escritorio	Dell	Optiplex 7010	Sistema operativo: Windows 8 Capacidad: 500 GB, 8 GB RAM Procesador: Intel Core i7 3.4 GHz

### 2.3.3 Aplicación de software

MPB al igual que SisAR se presenta como una GUI ante el usuario por medio de una aplicación de software desarrollada en la plataforma de programación de LabVIEW 2013<sup>®</sup>. La arquitectura de esta aplicación de software se muestra en la Figura 15.

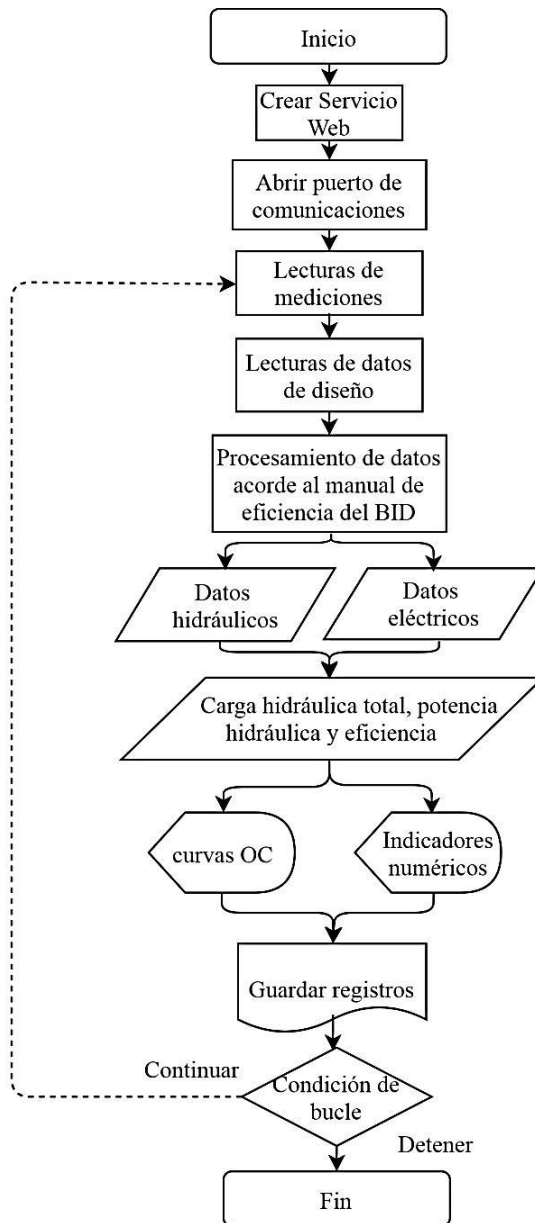


Figura 15. Arquitectura de funciones de monitoreo de MPB. Fuente: elaboración propia.

MPB es un VI que ejecuta las funciones del monitoreo de forma cíclica hasta que el usuario lo detiene; por lo tanto, los resultados tales como la carga total, potencia eléctrica y eficiencia se rastrean y presentan de forma continua. La definición de variables, fórmulas y procedimientos para el procesamiento de datos se obtuvieron del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en su manual de

eficiencia energética [32]. A continuación, se muestra la descripción general de la programación de la aplicación de software de MPB. Las operaciones se componen de 16 bloques de programación que son parte del VI para la gestión de la energía del edificio, desarrollado en LabVIEW 2013® (ver Figura 16).

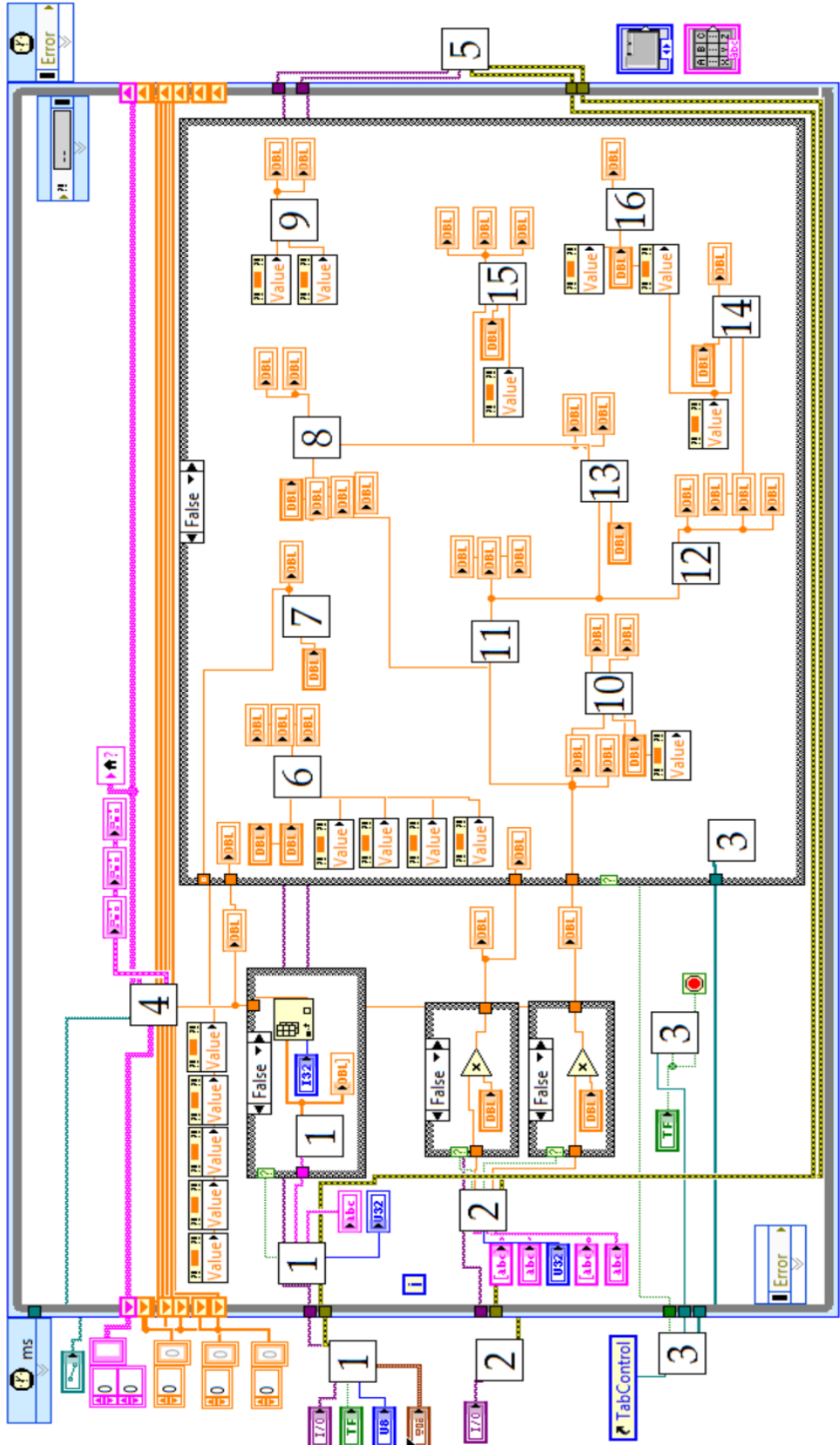


Figura 16. Bloques de programación que forman parte del instrumento virtual MPB que se desarrolló en la plataforma LabVIEW 2013. Fuente: elaboración propia.

Los bloques de programación que conforman la aplicación de software de MPB, se ejecutan dentro de una estructura de bucle con iteraciones realizadas cada segundo. Los bloques se enumeran del 1 al 16 según la secuencia y relevancia de las operaciones que se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10: Bloques de programación de la aplicación de software de MPB. Fuente: elaboración propia.

<b>Bloque</b>	<b>Función</b>
1.	Lectura de datos del equipo de medición eléctrica
2.	Lectura de datos del equipo de medición de flujo y presión manométrica
3.	Control del tabulador
4.	Creación de tabla y registro de lecturas
5.	Cerrar comunicaciones
6.	Cálculo de la TDH
7.	Cálculo de eficiencia global
8.	Cálculo de área del tubo
9.	Cálculo de eficiencia electromecánica
10.	Cálculo de potencia manométrica
11.	Cálculo de la velocidad
12.	Calculo de la carga por velocidad
13.	Cálculo del número de Reynolds
14.	Cálculo del factor de fricción
15.	Cálculo de pérdidas primarias de fricción
16.	Cálculo de pérdidas secundarias de fricción

Los resultados finales se muestran por medio de indicadores gráficos en una computadora como son las curvas OC. Esta herramienta al igual que SisAR tiene la capacidad de ofrecer un servicio web para que el usuario pueda visualizar e interactuar con la pantalla de la aplicación de software de forma remota, mediante

el uso de internet. En el capítulo siguiente se mostrarán las pantallas de la aplicación de software de MPB.

### 2.2.1 Modelo de diagnóstico

El paso inicial del diagnóstico consiste en la caracterización del comportamiento operativo actual de la bomba. Esto se realiza mediante la determinación de parámetros hidráulicos, eléctricos y de eficiencia involucrados durante el bombeo como se muestra en la Figura 17.

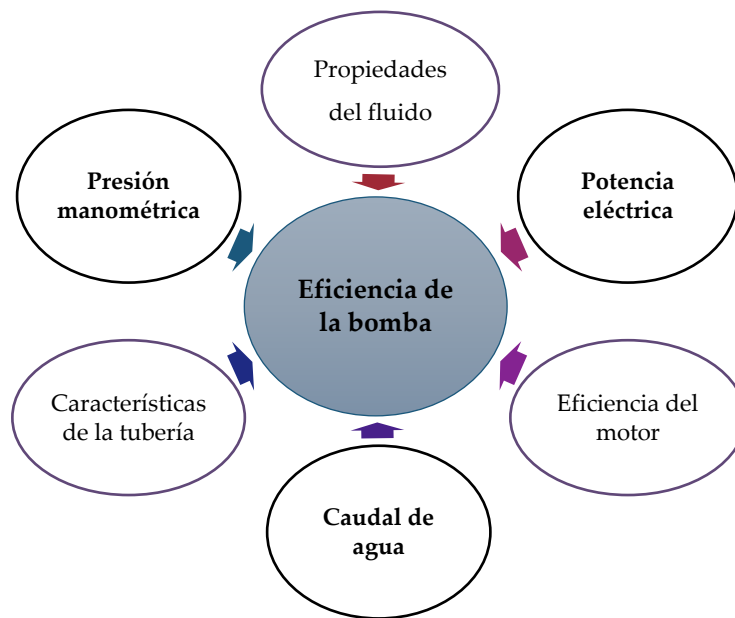


Figura 17. Información básica utilizada para la construcción de las curvas OC.

Fuente: elaboración propia.

La Figura 17 muestra una jerarquía radial entre las variables circundantes con respecto al resultado central. Las variables como son: flujo de agua, presión manométrica y potencia tienen el impacto más significativo en el valor de la eficiencia global. Conocer este último dato es de sumo valor, ya que con él se calcula el rendimiento de la bomba. Por otra parte, las propiedades del fluido incluyen densidad y viscosidad cinemática del fluido. Finalmente, las

características de la tubería se constituyen principalmente por el diámetro interno, el material de construcción y la longitud.

Una vez valorado el estado operativo actual de la bomba, se procede con su contraste contra los parámetros de operación que representan el régimen de trabajo óptimo. Este estado es declarado por el fabricante como el mejor punto de eficiencia (BEP por sus siglas en inglés). El BEP describe por diseño el flujo al cual debe trabajar la bomba para obtener la mayor eficiencia y que resulta en cierto BHP.

Evaluar la bomba mediante el análisis comparativo propuesto, permite diferenciar las magnitudes de rendimiento y consumo de EnE entre ambos estados (real y óptimo). Y con ello, determinar el ahorro de EnE y reducción de toneladas de CO<sub>2eq</sub> si la bomba operara en óptimas condiciones. El desarrollo de esta evaluación implica los siguientes pasos:

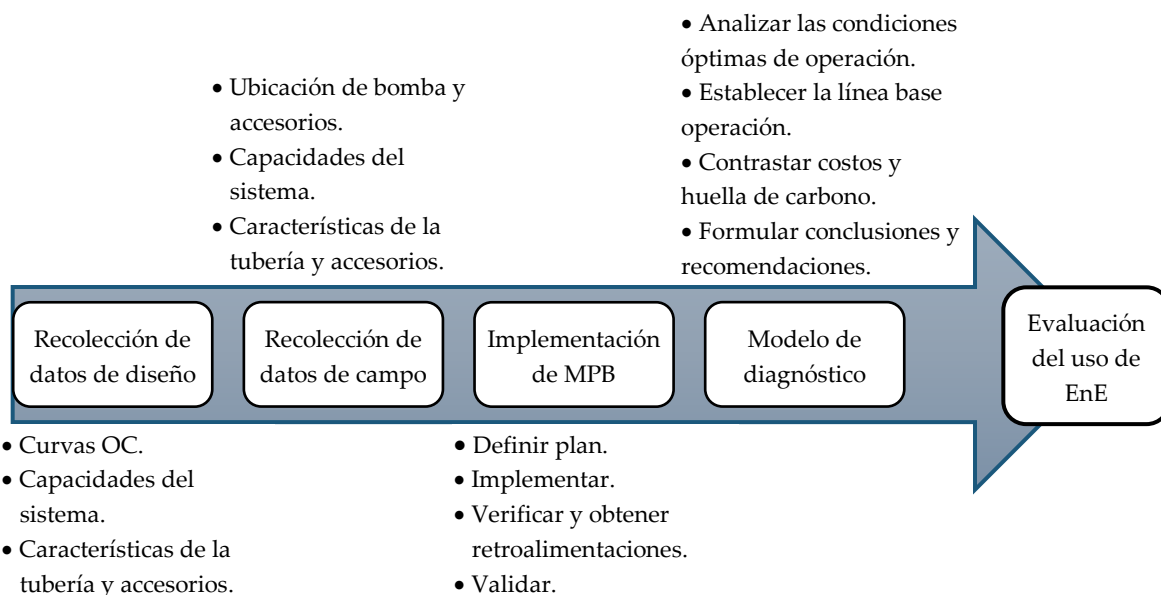


Figura 18. Fases de desarrollo del modelo de diagnóstico para la evaluación del uso de EnE en bombas. Fuente: elaboración propia.

## CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN EN CAMPO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

### 3.1 IMPLEMENTACIÓN DE SISAR EN UN EDIFICIO

#### 3.1.1 Caso de estudio

La efectividad de SisAR se validó en un campus universitario ubicado en la ciudad de Mexicali, B.C. México. El campus en cuestión alberga 35 edificios, los cuales están compuestos principalmente por aulas, laboratorios y oficinas. Adoptando un enfoque de estudio de caso, uno de estos edificios fue seleccionado para realizar el proyecto de implementación. El tiempo total requerido para el desarrollo del proyecto fue de aproximadamente 1 año y medio. La carta de intención puede consultarse en el Anexo D. En la Figura 19, se muestra una fotografía virtual del edificio seleccionado.

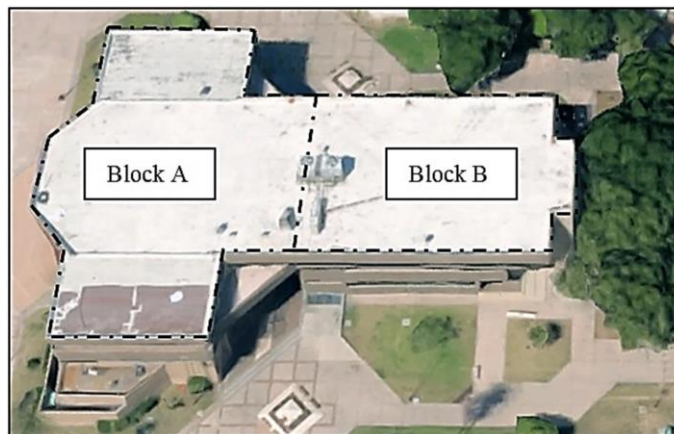


Figura 19. Imagen virtual del edificio bajo estudio. Fuente: elaboración propia.

La Figura 19 ilustra toda la construcción del caso de estudio y los espacios exteriores a su alrededor. Esta edificación contiene 73 oficinas distribuidas en 3

pisos. Además, ésta se divide en 2 áreas denominadas bloque A y bloque B, las cuales, se encuentran interconectadas por corredores centrales. La información principal del edificio se resume en la Tabla 11.

Tabla 11. Características generales del edificio donde fue implementado SisAR.

Fuente: elaboración propia.

<b>Infraestructura</b>	<b>Data</b>
Área	5,768 m <sup>2</sup>
Niveles	3
Oficinas en el bloque A	46
Oficinas en el bloque B	33
<b>Sistema eléctrico</b>	
Tarifa eléctrica	HM
Voltaje fase-fase	480 V
Voltaje fase-neutro	277 V
<b>Operaciones</b>	
Tipo	Administrativo
Empleados	102
Días hábiles	5/semana
Horas de trabajo	10/día

Como se ha mencionado, el mayor proveedor actual de electricidad en México es CFE; esta empresa aplica varias tarifas de precios según el tipo de usuario. La tarifa HM se aplica en servicios de media tensión con una demanda mínima contratada de 100 kW. Dentro de esta tarifa, el precio del kWh depende de la temporada, del mes, del día de la semana, de los días festivos y de acuerdo con la hora del día [33].

### 3.1.2 Procedimiento, resultados y discusión

En esta sección, se presentan los métodos y pasos utilizados para la implementación de SisAR en el edificio bajo estudio.

En primer lugar, la aplicación de campo requiere la instalación de los elementos de hardware dedicados a la medición de parámetros eléctricos. Dichos elementos están compuestos por: 3 TC's, 4 cables de voltaje y un módulo medidor eléctrico. El equipo de medición fue ubicado en el centro de carga principal como se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Equipo de medición eléctrica de SisAR ubicado en el centro de carga principal: (a) Transformadores de corriente; (b) cables de voltaje; (c) Medidor eléctrico. Fuente: elaboración propia.

De la Figura 20, se pueden observar los componentes del medidor eléctrico y su disposición dentro del centro de carga principal del edificio. Como referencia, el tipo de configuración eléctrica con el cual se alimenta el centro de carga es trifásica a 4 hilos.

El proceso de instalación del equipo en cuestión no requiere de la interrupción del suministro eléctrico, por lo tanto, se puede describir como “no invasivo”. Para lograr esto, se utilizan cables de voltaje con pinzas tipo cocodrilo y TC’s de núcleo partido; ambos son utilizados para “abrazar” al conductor eléctrico.

En segundo lugar, los resultados de las mediciones deben ser enviados a la computadora equipada con la aplicación de software de SisAR. Para el caso de estudio en específico, la computadora pudo ser ubicada cerca del centro de carga principal. Por lo tanto, se eligió el conexionado alámbrico entre el equipo de medición y la computadora para obtener una mayor confiabilidad en el transporte de datos. La instalación de la computadora y los instrumentos de comunicación conformados por el enrutador y el adaptador RS-485 se muestran en la Figura 21.

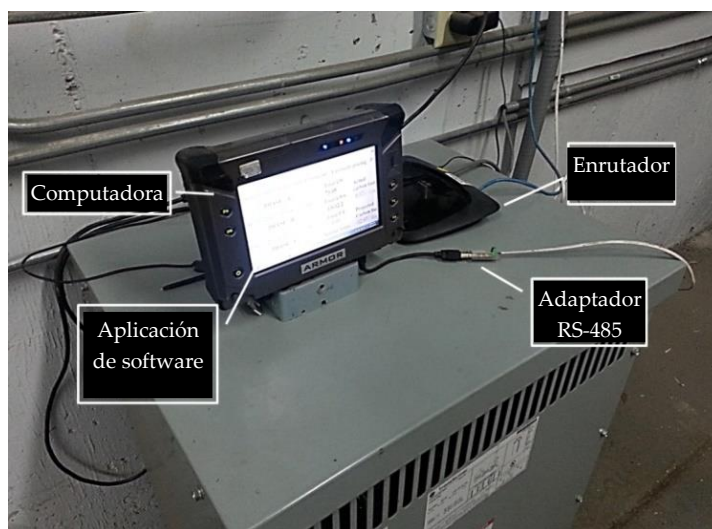


Figura 21. Computadora, aplicación de software e instrumentos de comunicación de SisAR. Fuente: elaboración propia.

De la Figura 21, la aplicación de software se presenta como un programa en ejecutable para la plataforma de Windows. Es compatible con Windows 7, 8, 10 y muy probablemente en las próximas generaciones de Windows e incluso se puede utilizar mediante el uso de una máquina virtual. Dicha aplicación opera de forma cíclica para trabajar continuamente sin apoyo del usuario. Por lo tanto, puede ejecutarse durante meses y no requiere reinicio. Si se produce un apagón o se requiere mantenimiento de la fuente de alimentación, la computadora también está equipada con una batería de respaldo para funcionar durante un tiempo estimado de 3 horas. En adición, se puede integrar una fuente de alimentación ininterrumpida (UPS por sus siglas en inglés) a requerimiento.

Las capturas de pantalla de la aplicación de software de SisAR, se ilustran a continuación a través de las Figuras 22, 23 y 24.

Parámetros eléctricos y huella de carbono				Costos de electricidad	Perfil de demanda
<b>FASE "A"</b>				<b>Total kW</b>	<b>Huella de carbono actual</b>
Amps	Volts	kW	P.F.	<b>73.05</b>	<b>6.17</b> Tons of CO <sub>2</sub>
146.15	259.7	35.68	0.94		
<b>FASE "B"</b>				<b>Total kWh</b>	<b>Huella de carbono proyectada</b>
Amps	Volts	kW	P.F.	<b>13612.2</b>	<b>12.97</b> Tons of CO <sub>2</sub>
82.81	265.4	21.1	0.96	<b>P.F</b>	
<b>FASE "C"</b>				<b>0.95</b>	
Amps	Volts	kW	P.F.		
64.88	261.2	16.27	0.96		

Figura 22. Primer grupo de información (parámetros eléctricos y huella de carbono) de la aplicación de software de SisAR. Fuente: elaboración propia.

A la izquierda de la Figura 22, se muestran los resultados de las mediciones eléctricas básicas. Las desviaciones entre los valores de corriente y voltaje se pueden analizar en tiempo real para encontrar el desequilibrio de corriente y las caídas de tensión en el sistema eléctrico. En la sección central, el indicador de

consumo (kWh) presenta la cantidad de EnE consumida por el edificio desde que comenzó el monitoreo. Este valor es utilizado para calcular la huella de carbono actual y para proyectar su impacto al final del mes (como se muestra a la derecha de la Figura 22). Las emisiones de CO<sub>2eq</sub> se calculan de acuerdo con un factor equivalente de 0.454 toneladas de CO<sub>2eq</sub>/MWh; este factor fue publicado en el 2015 por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) [34]. La segunda sección de la aplicación de software de SisAR presenta los costos de la electricidad en moneda nacional (\$MXN).

Parámetros eléctricos y huella de carbono		Costos de electricidad		Perfil de demanda
<b>Invierno</b>				
Max. potencia intermedio	Max. potencia base	Costo actual		
0	0	\$ 62525.9		
<b>Verano</b>				
Max. potencia intermedio	Max. Potencia pico	Costo proyectado		
124845	102369	\$ 126790.3		
Demanda facturable	P.F.	Penal. %	\$	
Factor 106	0.93	0	939.96	
\$ 41103.7		Bonif. %		
		0.93		

Figura 23. Segundo grupo de información (costos de electricidad) de la aplicación de software de SisAR. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo que publica CFE en su sitio web [33], la tarifa HM está constituida por el consumo de EnE (kWh), la demanda (kW), el factor de potencia (0-1) y el impuesto regional (16%). La aplicación de software de SisAR hace uso de la misma metodología de cálculo de costos publicada por el mencionado proveedor. Como referencia, el cargo de demanda se obtiene utilizando la medición continua de la potencia en bloques con intervalos de 15 minutos y sub-intervalos de 5 minutos. La penalización o bonificación relacionada con el factor de

potencia se calcula según un umbral de 0.90. La multa puede alcanzar el 120% sobre el costo agregado del consumo de EnE acumulada y el cargo de demanda, pero sólo un descuento que llega hasta el 2.5% como bonificación.

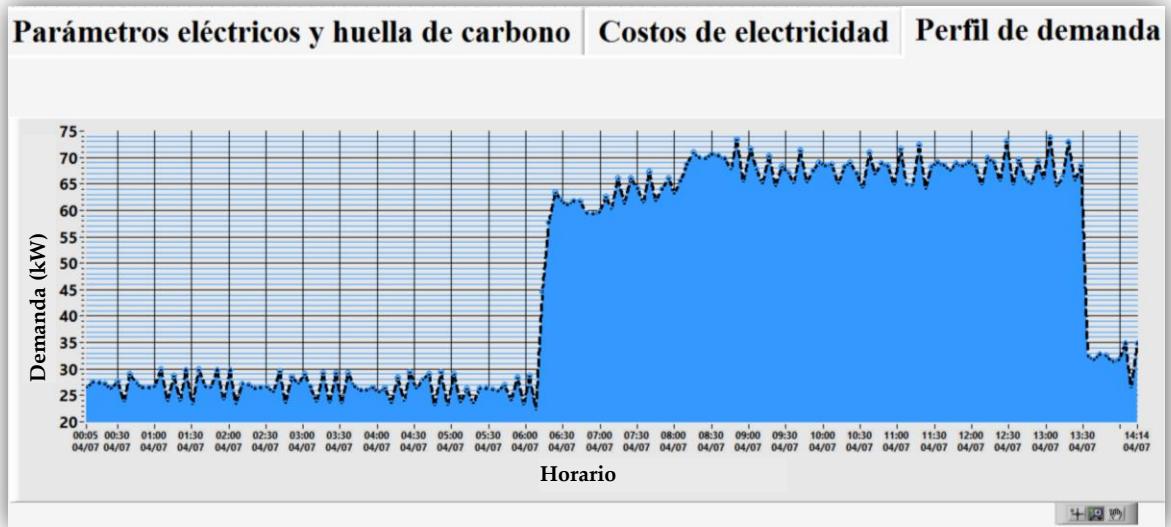


Figura 24. Tercer grupo de información (perfil de demanda) de la aplicación de software de SisAR. Fuente: elaboración propia.

La Figura 24 muestra el perfil de potencia horario relacionado con la demanda de EnE. Como se puede observar, este edificio presenta un perfil irregular. Dentro de la gráfica de potencia, los valores se registran cada segundo y los marcadores de escala se agregan cada media hora. Cuando la función dedicada a la generación de la gráfica detecta el cambio de día, la imagen del histórico se guarda y posteriormente se reinicia el proceso de grabación. Esta función es útil para analizar gráficamente el efecto de encender/apagar cargas medianas y grandes a lo largo del día; además, el usuario puede relacionar este efecto con los diferentes cargos que aparecen en la factura.

La aplicación de software de SisAR puede ser utilizada por el usuario desde la computadora en la cual se encuentra instalada o desde cualquier ubicación

usando otra computadora a través de un navegador web común como internet Explorer. El acceso remoto se puede proteger con una cuenta de usuario convencional y administración de contraseñas, si el usuario lo requiere por seguridad. Además, el usuario puede usar la aplicación de software como tal o solicitar modificaciones y actualizaciones con un costo menor relacionado con la inversión inicial.

La precisión de las medidas eléctricas mostradas por la aplicación de software se respalda por el uso de instrumentos comerciales (medidor eléctrico de la marca EKM) seleccionados con un nivel de confiabilidad aceptable. Además, las mediciones de los parámetros eléctricos se verificaron con un analizador de calidad de energía trifásico de la marca Fluke con desviaciones dentro del  $\pm 2\%$ .

Finalmente, la instalación y puesta en marcha de SisAR se realizó en aproximadamente 45 minutos y fue llevada a cabo por 2 personas con conocimientos técnicos básicos.

### **3.1.3 Evaluación**

La operación de SisAR se utilizó durante el período de una semana para validar los objetivos presentados en este trabajo. Si el sistema se usa por meses o años, arrojaría datos valiosos para ayudar a identificar oportunidades de ahorro de EnE por parte del administrador del edificio y de los empleados. Por lo tanto, usando el marco de desarrollo metodológico del modelo de diagnóstico propuesto, se obtiene un análisis básico de puntos interesantes que permiten relacionar el uso de las principales cargas eléctricas con la información provista por la aplicación de software de SisAR.

### 3.1.3.1 Rendimiento fijo

Este apartado es el punto de partida para conocer el impacto de los requisitos de confort humano y las actividades de los usuarios en el uso y consumo de la EnE en el edificio. Los datos de campo fueron obtenidos a través de entrevistas con los empleados y la inspección de las principales cargas eléctricas en operación. Por razones prácticas, dichas cargas se dividen de la siguiente manera: sistema de Aire Acondicionado (A/C por sus siglas en inglés) con 130,28 kW, iluminación externa con 21,94 kW, iluminación interna con 80,7 kW y cargas misceláneas diversas con 29,81 kW (ver Tabla 12).

Tabla 12. Indicadores de rendimiento fijo. Fuente: elaboración propia.

m <sup>2</sup> / empleado	m <sup>2</sup> / Tons. de A/C	A/C W/m <sup>2</sup>	Ilum. interior W/m <sup>2</sup>	Ilum. exterior W/m <sup>2</sup>	Misc. W/m <sup>2</sup>
56.54	36.05	22.58	14	7.5	5.17
<b>Potencia total de A/C e iluminación / m<sup>2</sup></b>					
44.08					

Analizando los datos que se muestran en la Tabla 12, la iluminación interna y el A/C indican un alto impacto en la demanda de EnE debido al uso intensivo. En el edificio bajo estudio, ambos sistemas son operados manualmente por los empleados responsables. El sistema de A/C es programado de forma cotidiana con una temperatura de operación fija. Por lo tanto, se puede lograr un importante ahorro de EnE mediante el uso de controles de iluminación automáticos y con una administración eficaz y oportuna del A/C.

### 3.1.3.2 Demanda de potencia

En la Figura 25, se muestra el gráfico de demanda de potencia que representa el comportamiento del uso de EnE en el edificio para cada día de la semana.

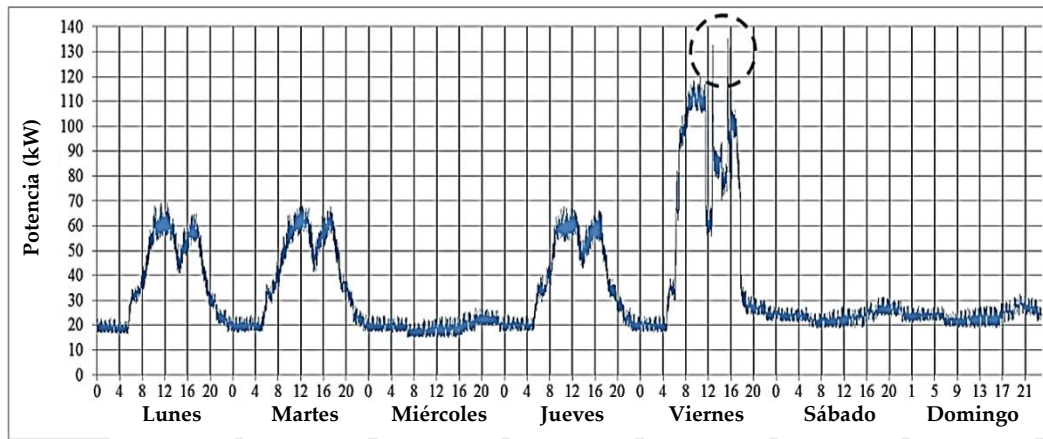


Figura 25. Perfil de demanda diaria y horaria. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 25 se puede observar que el miércoles, el sábado y el domingo presentan una demanda de EnE con un perfil casi horizontal de aproximadamente 23 kW. En estos días, la mayor parte de la potencia eléctrica corresponde a la iluminación externa, algunos electrodomésticos y el sistema de A/C utilizado para la sala de servidores de internet. Enmarcado, el viernes muestra un perfil atípico con una demanda máxima instantánea de hasta 135 kW. De acuerdo con una entrevista realizada al personal de mantenimiento del edificio en cuestión, la demanda atípica fue provocada por pruebas en el sistema de A/C principal.

### 3.1.3.3 Desbalance de corriente y caídas de voltaje

El desbalance de corriente y las caídas de tensión son efectos indeseables que siempre estarán presentes en una instalación industrial o una red eléctrica de distribución. Según Green y Prodanovic (2007), estos pueden ser encontrados muy

comúnmente debido a la gran cantidad de cargas monofásicas [35]. Además, según Fan et al. (2010), son causa de operaciones anormales como una falla de fase y cargas asimétricas [36].

El objetivo de su conocimiento es el de asegurar que el flujo de EnE se encuentre en condiciones y valores permitidos por la normatividad nacional e internacional ya sea en los tableros de media tensión y los tableros de baja tensión [37].

En la Figura 26, se muestran las desviaciones entre las corrientes de los conductores eléctricos que fueron obtenidas a través del procesamiento de los resultados del monitoreo.

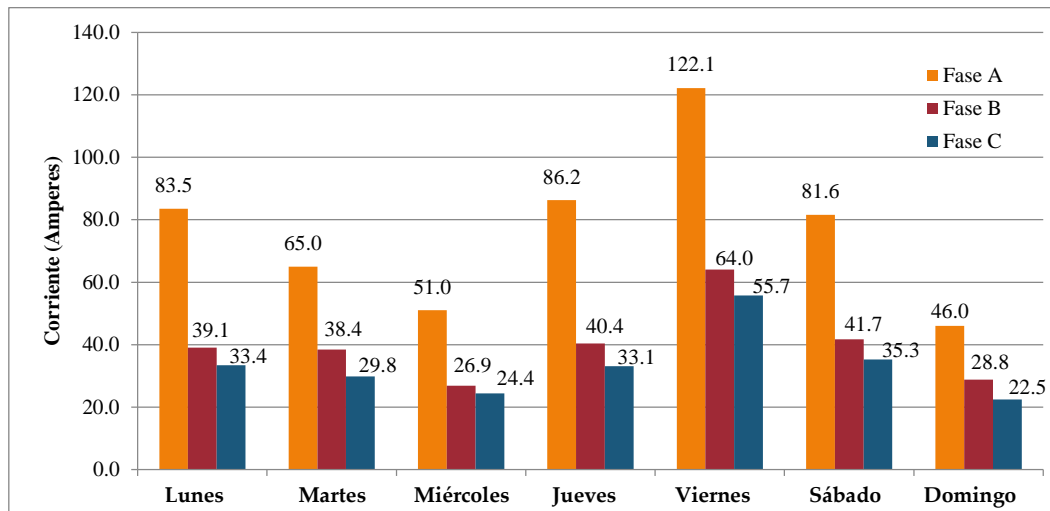


Figura 26. Promedio diario del valor de las corrientes en el sistema eléctrico del edificio bajo estudio. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 26, se puede observar una distribución inadecuada de cargas en el centro de carga principal. El mayor desequilibrio de corriente ocurrió en días laborables debido a la intrusión constante de cargas monofásicas. El día viernes, las pruebas en el sistema principal de A/C causaron una diferencia de 66.4 A entre las

fases A y C y, con respecto al suministro nominal, se detectaron caídas de voltaje de hasta el 7.5%.

La norma oficial mexicana NOM-001-SEDE-2012 establece que la caída máxima de tensión de los circuitos alimentadores y derivados hasta la salida más lejana no supere el 5% para proporcionar una eficiencia razonable de funcionamiento [38]. En el mismo contexto, la normatividad internacional como lo son los estándares IEEE 141 y 242 recomienda que las caídas de tensión sean de  $\pm 5\%$  y +5 a -10%, respectivamente [37].

La caída de tensión excesiva en cualquier sistema eléctrico puede tener efectos perjudiciales. Pone en riesgo las máquinas y herramientas de las plantas industriales, incrementa la corriente lo que provoca un mayor calentamiento en los conductores, que a su vez ocasiona daños en el aislamiento de estos y en la instalación en general. El incremento de corriente también impacta en un mayor consumo de EnE y esto puede ser reflejado en valores financieros [39].

La recomendación es realizar una distribución equitativa de las cargas y la compensación de voltaje para mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico, utilizando como un dato un margen del  $\pm 3\%$  en los tableros de distribución principal, para que los alimentadores derivados y sus respectivos buses se encuentren dentro de los estándares internacionales.

### 3.1.3.4 Factor de potencia

Tabla 13. Factor de potencia diario. Fuente: elaboración propia.

<b>Día de la semana</b>	<b>Factor de potencia</b>	<b>Penalización</b>	<b>Bonificación</b>
Lunes	0.87	2.06%	-
Martes	0.88	1.36%	-
Miércoles	0.71	16.05%	-
Jueves	0.87	2.06%	-
Viernes	0.88	1.01%	-
Sábado	0.94	-	1.06%
Domingo	0.94	-	1.16%

En la Tabla 13, se muestran los promedios diarios individuales del factor de potencia y su efecto de acuerdo con la tarifa HM aplicada a este edificio. El miércoles, la penalización fue del 16.05%, como consecuencia de no haber apagado las luces exteriores durante el día. La evidencia de este hecho se obtuvo de la comparación entre los perfiles de potencia de los días hábiles e inhábiles restantes. Finalmente, el promedio semanal fue dirigido a una penalización promedio del 2%.

La iluminación exterior es un factor importante que puede causar un cargo adicional y significativo en la facturación, por lo tanto, es necesario un monitoreo prolongado para determinar la factibilidad de sustituir la tecnología utilizada y compensar la reactancia inductiva mediante la adición de un banco de capacitores.

### 3.1.3.5 Consumo de EnE

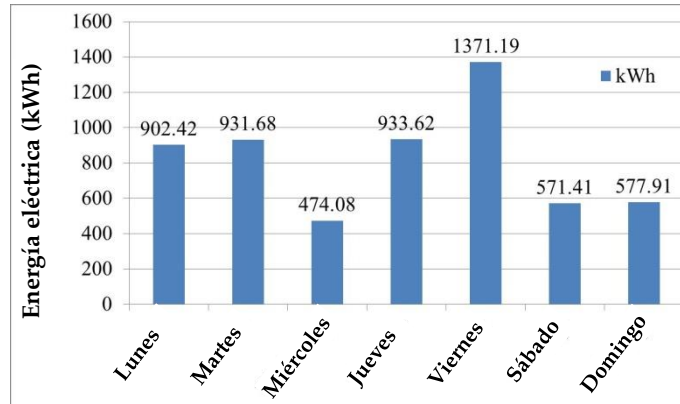


Figura 27. Histórico de consumo diario de EnE. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 27, el consumo de EnE representó en días inhábiles hasta el 64% del consumo con respecto a los días hábiles, comparando el consumo de domingo contra el consumo del lunes. El día que se consumió mayor cantidad de EnE fue el viernes con aproximadamente un 30% más que el lunes, el martes o el jueves; efecto causado por las pruebas del sistema principal de A/C. El consumo total para esta semana fue de 5.762 kWh y se considera alto. Por lo tanto, estos resultados muestran que el edificio requiere una mejor administración, especialmente en días no laborables.

### 3.1.3.6 Indicadores energéticos y huella de carbono

Tabla 14. Indicadores energéticos y huella de carbono. Fuente: elaboración propia.

kWh/ empleado	kWh/m <sup>2</sup>	Toneladas de CO <sub>2eq</sub>	Toneladas de CO <sub>2eq</sub> /empleado
56.49	0.99	2.62	.026

En la Tabla 14, se puede observar cuánta EnE consume el edificio y el impacto ambiental de acuerdo con el uso de una semana. La huella de carbono

tiene una magnitud muy alta debido a su relación directa y proporcional al consumo. En promedio, por cada 39 empleados, debido al uso del edificio, se emite indirectamente 1 tonelada de carbono por semana.

### 3.1.3.7 Costo de la electricidad e indicadores de costos

Tabla 15. Desglose del costo de la EnE e indicadores de costos (\$MXN). Fuente: elaboración propia.

<b>Costos</b>			
<b>EnE</b>	<b>Demanda</b>	<b>Penalización por factor de potencia</b>	<b>Costo total incluyendo IVA (16%)</b>
6,637.68	5,191.92	236.88	13,997.70
<b>Indicadores</b>			
<b>\$/kWh</b>	<b>\$/Empleado</b>	<b>\$/m<sup>2</sup></b>	
1.15	137.16	2.08	

De la Tabla 15, se presenta una cantidad relativamente baja de costo de electricidad; esto se debe al bajo costo estacional de la EnE. En verano, el costo unitario de EnE (\$/kWh) en las horas pico puede alcanzar un estimado de \$2.52 MXN; en este escenario, el costo total podría duplicarse.

Eventualmente, con un monitor de costos se puede visualizar en tiempo real el efecto de la implementación de acciones de ahorro de EnE y puede crear conciencia en los empleados de manera persuasiva. La recomendación es utilizar la metodología propuesta de forma permanente.

## 3.2 IMPLEMENTACIÓN DE MPB EN UNA BOMBA

### 3.2.1 Caso de estudio

La efectividad del instrumento virtual MPB se validó en una planta de tratamiento que suministra agua potable a la ciudad de Mexicali, B.C., México. La duración de este proyecto fue de aproximadamente 1 año. La carta de intención puede consultarse en el Anexo E. Como referencia, esta planta se abastece con agua proveniente del Río Colorado.

El sistema de bombeo del caso de estudio se compone de 12 bombas verticales conectadas en una configuración en paralelo. Del conjunto, se seleccionó una bomba para dar inicio con la implementación de MPB, ver Figura 28.



Figura 28. Bomba vertical de la planta de tratamiento de agua bajo estudio. Fuente: elaboración propia.

La Figura 28 muestra la tubería de descarga de cada bomba que está conectada en paralelo. Esta configuración es utilizada para agregar flexibilidad de

flujo a una tubería principal que alimenta la red de distribución a la ciudad. La planta funciona continuamente las 24 horas con 5 bombas en operación permanente para suministrar un flujo de agua de 7,200 m<sup>3</sup>/h con una presión manométrica de 52 psi (359 kPa), aproximadamente. La potencia nominal de los motores es de 300 kW a 480 V.

### 3.2.2 Procedimiento, resultados y discusión

La siguiente sección describe las acciones secuenciales que se realizaron para instalar los elementos de hardware de MPB y para ejecutar la aplicación de software. En primer lugar, la caracterización del comportamiento hidráulico del fluido comprendió la instalación de dos sistemas de medición de presión y flujo, respectivamente. Ver la Figura 29.

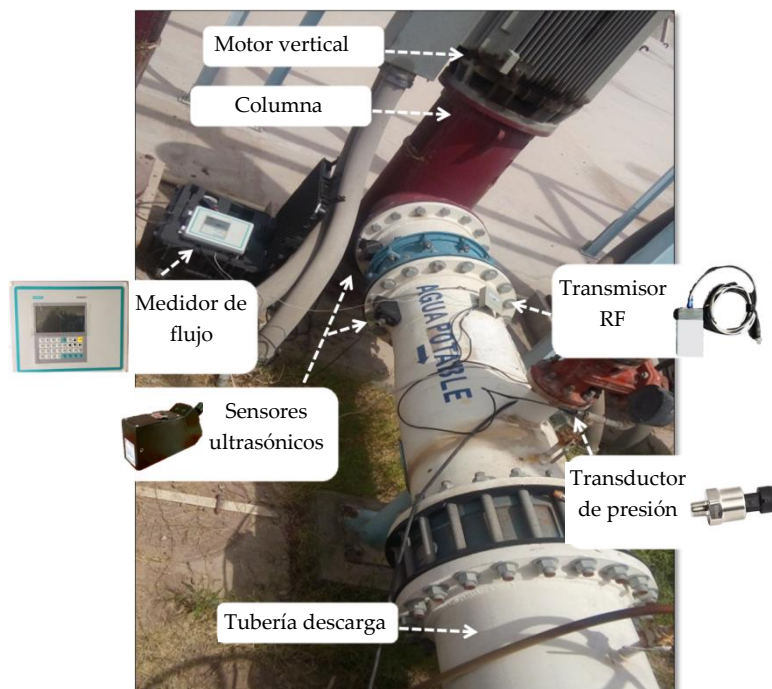


Figura 29. Equipo de medición y transmisión de datos de MPB instalados en la bomba. Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse en la Figura 29, las lecturas de flujo de agua fueron adquiridas con equipo de medición ultrasónico que cuenta con dos sensores de superficie. La exactitud de las lecturas fue comparada utilizando otro medidor comercial con desviaciones dentro del  $\pm 3\%$ . La presión de descarga se midió con un sensor electrónico instalado en paralelo con un medidor analógico existente para comparar las lecturas; las desviaciones se encontraron dentro del  $\pm 2\%$ . El transmisor RF desarrollado por el autor, fue utilizado para compilar las señales de las mediciones en un sólo paquete de datos para ser enviado hacia la computadora.

En segundo lugar, el comportamiento eléctrico de la bomba vertical comprende la instalación de un medidor eléctrico para medir la potencia eléctrica. Este fue instalado en el centro de carga principal ubicado en la sala de control principal de la planta de tratamiento, como se muestra en la Figura 30.

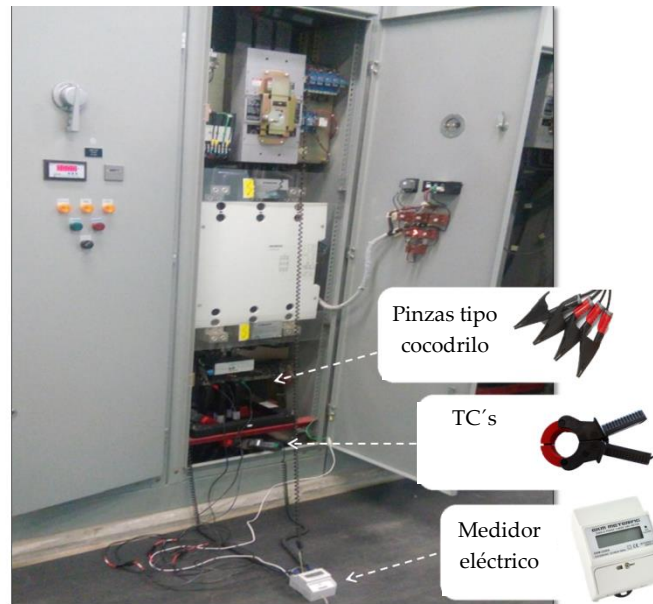


Figura 30. Equipo de medición de parámetros eléctricos instalado en el centro de carga de la bomba. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 30, se puede observar que el equipo de medición es el mismo utilizado por SisAR, por lo tanto, cuenta con la cualidad de “no invasivo”.

En tercer lugar, la computadora se ubicó dentro del cuarto de control al igual que el medidor de parámetros eléctricos. Por esta razón, las medidas de potencia eléctrica se transmitieron utilizando conexión directa por cable. Con esta opción, se presenta una mayor confiabilidad en la transmisión de datos.

Por último, dos receptores de datos de tipo Universal Serial Bus (USB) se conectaron a la computadora para recibir la información proveniente del transmisor RF compuestas por las lecturas de caudal de agua, la presión y la potencia eléctrica. Luego, se instaló y ejecutó la aplicación de software de MPB en la computadora tal como se muestra en la Figura 31.

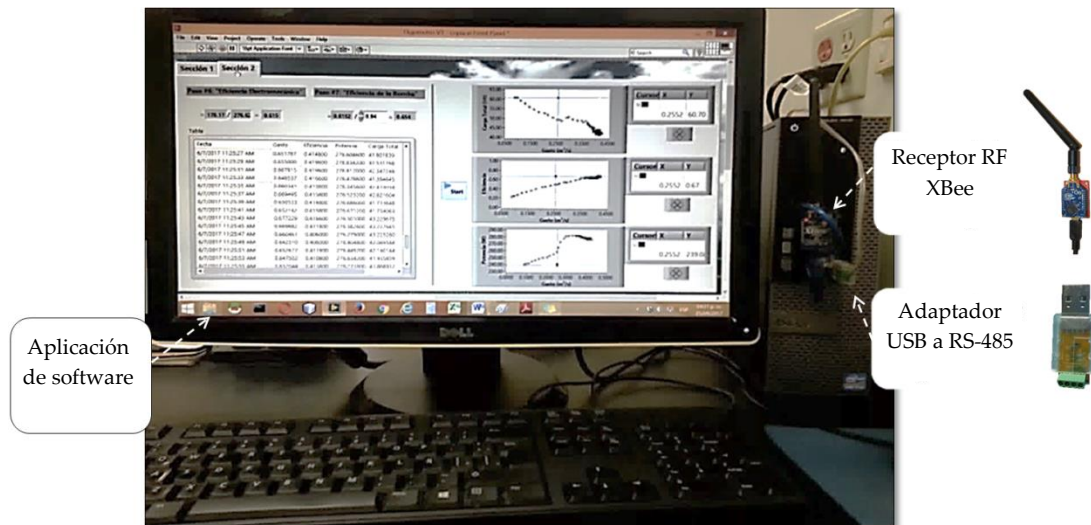


Figura 31. Computadora equipada con la aplicación de software denominada MPB e instrumentos para la recepción alámbrica e inalámbrica de datos. Fuente: elaboración propia.

La Figura 31 muestra una computadora de escritorio equipada con la aplicación de software de MPB y los dispositivos de comunicación. Con respecto a

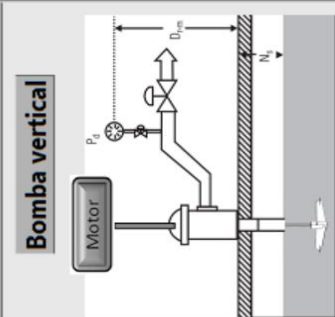
estos últimos, el módulo Xbee recibe la señal inalámbrica proveniente del transmisor de RF y, el adaptador RS-485 recibe los datos eléctricos provistos por el medidor eléctrico.

La aplicación de software puede ejecutarse en computadoras con requisitos de sistema moderados que tienen Windows 7, 8, 10 y muy probablemente en las próximas generaciones de Windows. Esta aplicación muestra indicadores gráficos en un panel frontal con una frecuencia de muestreo de un segundo. Las operaciones de supervisión se realizan cíclicamente por lo que no es necesario reiniciar o reprogramar; por lo tanto, el usuario puede usar la aplicación como tal. Además, una imagen virtual del panel frontal se puede visualizar de forma remota con otra computadora a través de un navegador web común como Internet Explorer. El acceso remoto se puede proteger con una cuenta de usuario convencional y administración de contraseñas si el usuario lo requiere.


La información presentada por el software de monitoreo en tiempo real propuesto, se divide en dos grupos como se muestran en las Figuras 32 y 33.

**Sección 1**

**Sección 2**



**Bomba vertical**



---

**Paso #1: "Área"**

$$= 3.1416 * (0.4381)^2 / 4 = 0.1508 \text{ m}^2$$

**Paso #2: "Velocidad"**

$$= 0.406 / 0.1508 = 2.693 \text{ m/s}^2$$

---

**Paso #3: "Número Reynolds"**

$$= 2.693 * 0.43 / 0.00000836 = 1411260.08$$

---

**Paso #4: "Carga velocidad"**

$$= (2.692)^2 / 19.62 = 0.369 \text{ m}$$

**Paso #5: "Factor fricción"**

$$= (0.4381) / ((3.7) + (5.74) / 1411260.08^{0.9})^2 = 0.01323$$

---

**Paso #6: "Pérdida primaria fricción"**

$$= 0.01322 * (4.5 / 0.43) * (0.369) = 0.0186 \text{ m}$$

**Paso #7: "Pérdidas fricción secundarias"**

$$= 0.01322 * 0.1 * (0.369) = 0.0137 \text{ m}$$

---

**Paso #8: "Carga hidráulica"**

$$= (52.93 * 0.703) + 4.5 + 1 + 0.369 + 0.032 = 43.1 \text{ m}$$

**Paso #9: "Potencia hidráulica"**

$$= 43.1 * 0.406 * 996 * 9.81 / 1000 = 171 \text{ kW}$$

Figura 32. Primer grupo de datos (sección 1) de la aplicación de software de MPB. Fuente: elaboración propia.

La Figura 32 presenta los parámetros relacionados con el comportamiento hidráulico de la bomba durante su funcionamiento. Las medidas del flujo de agua y la presión se incluyen implícitamente en las fórmulas con un valor de  $0.406 \text{ m}^3$  y  $52.93 \text{ psi}$  ( $3.72 \text{ kg/cm}^2$ ), respectivamente. Como referencia, las fórmulas del número de Reynolds y la potencia del medidor incluyen la información obtenida de las tablas de propiedades del agua de acuerdo con la temperatura; y, el factor de fricción incluye la rugosidad absoluta de la tubería como una característica del material con un valor de  $0.0000457 \text{ m}$ . A la izquierda, se muestran las referencias gráficas del objeto de estudio para facilitar los procedimientos de medición y su identificación. La primera sección de la aplicación de software de MPB, permite al usuario relacionar las variaciones de flujo de agua con la carga total y la potencia hidráulica con respecto a diferentes rutinas de trabajo.

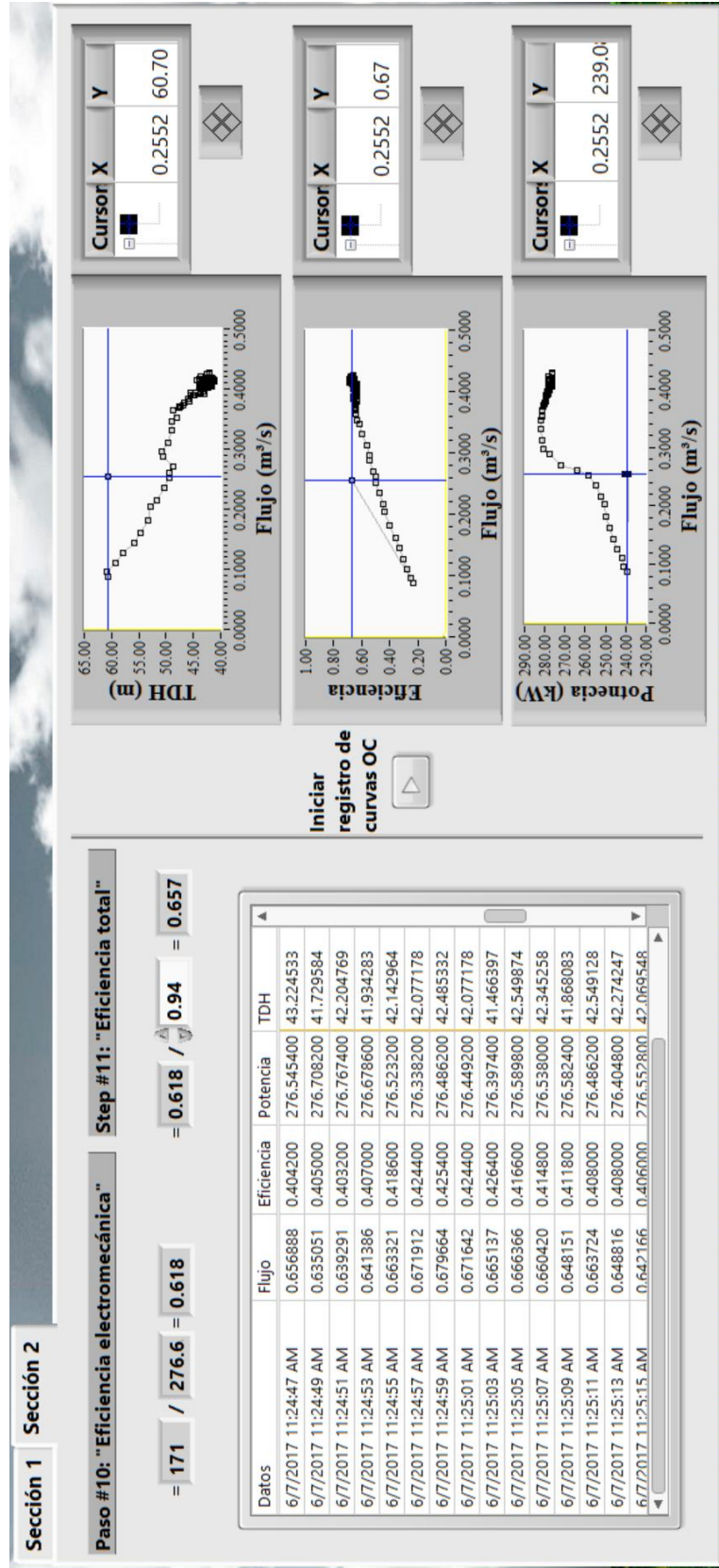


Figura 33. Segundo grupo de datos (sección 2) de la aplicación de software denominada MPB. Fuente: elaboración

En la Figura 33, el número a la derecha sobre la tabla muestra la eficiencia de la bomba como 0.657 (65.7%) para este punto de operación específico. Como se puede observar, la aplicación de software permite al usuario conocer el efecto de diferentes condiciones de operación sobre la eficiencia global. Debajo de esto, una función de registro automático llena una tabla con los resultados más importantes. En el medio, un botón virtual permite al usuario iniciar la grabación de las curvas OC cuando está activado. La aplicación genera de forma automática las curvas OC de la bomba durante su funcionamiento. Esta función fue diseñada para ser utilizada cuando el índice de flujo es ascendente. En el estudio de caso, se varió el flujo utilizando una válvula de mariposa. Los gráficos obtenidos "Caudal - Potencia", "Caudal - Carga total" y "Caudal - Eficiencia" son útiles para establecer las mejores condiciones de trabajo en las que la bomba opera con el máximo rendimiento.

La implementación del instrumento virtual MPB fue realizada por dos técnicos capacitados. El tiempo para completar las tareas fue un promedio de 45 minutos. La instalación del equipo de medición no comprometió la integridad de la tubería y no requirió el apagado de la bomba; por lo tanto, el suministro de agua no se suspendió.

La precisión y exactitud de los resultados obtenidos por la aplicación de software de MPB se verificaron con una herramienta de evaluación de bombas desarrollada en Excel, que fue validado previamente en proyectos realizados por la Facultad de Ingeniería de la UABC.

### **3.2.3 Evaluación**

En esta sección, se presenta un análisis comparativo básico entre los resultados obtenidos de la aplicación de MPB y el régimen de trabajo óptimo de la

bomba para mostrar la intención del instrumento virtual. Específicamente, las curvas OC obtenidas por la aplicación precedente de MPB son comparadas con las curvas OC del fabricante para encontrar las desviaciones (ver Figura 34).

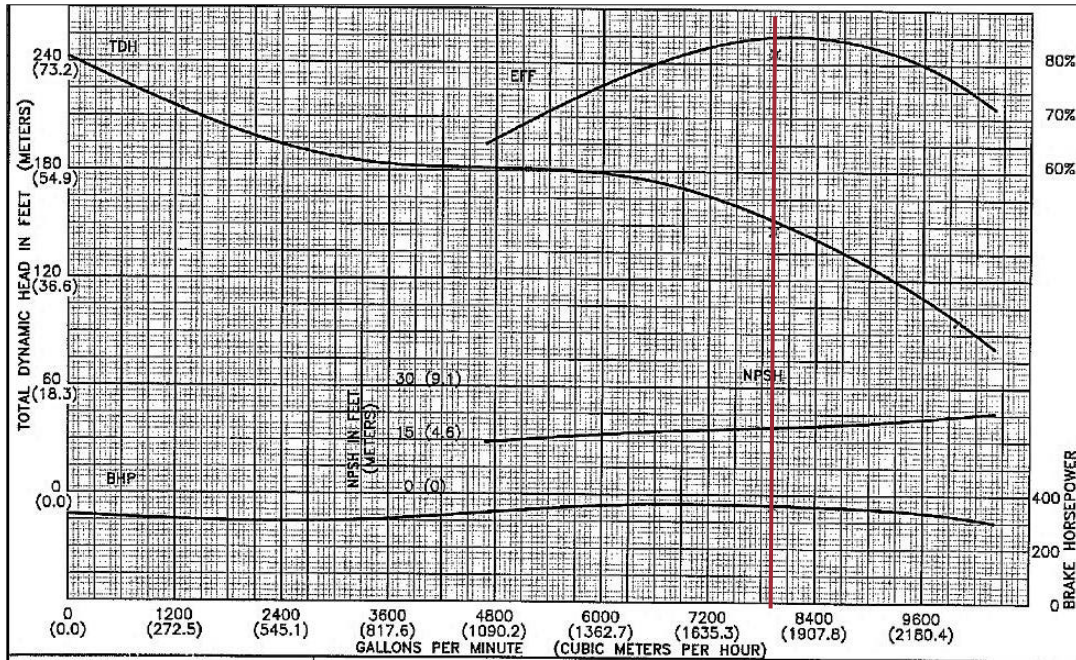


Figura 34. Gráfica de rendimiento del proveedor de la bomba. Fuente: usuario.

De la Figura 34, el mejor punto de eficiencia del fabricante (BEP) está marcado con un 82%, un TDH de 44.8 y un BHP equivalente a 279 kW a una tasa de flujo de agua de 1,812 m³/h. El gráfico de rendimiento del fabricante indica que la bomba seleccionada puede operar en varios estados de eficiencia en el rango de 65% - 85% con un flujo de 1,000 m³/h a 2,347 m³/h, aproximadamente. Como referencia, esta información se establece para una velocidad del motor de 1,190 RPM.

Después de definir los parámetros de la etapa óptima, se comparan con la información obtenida en las curvas OC como resultado de la aplicación MPB (consulte las Figuras 35, 36 y 37).

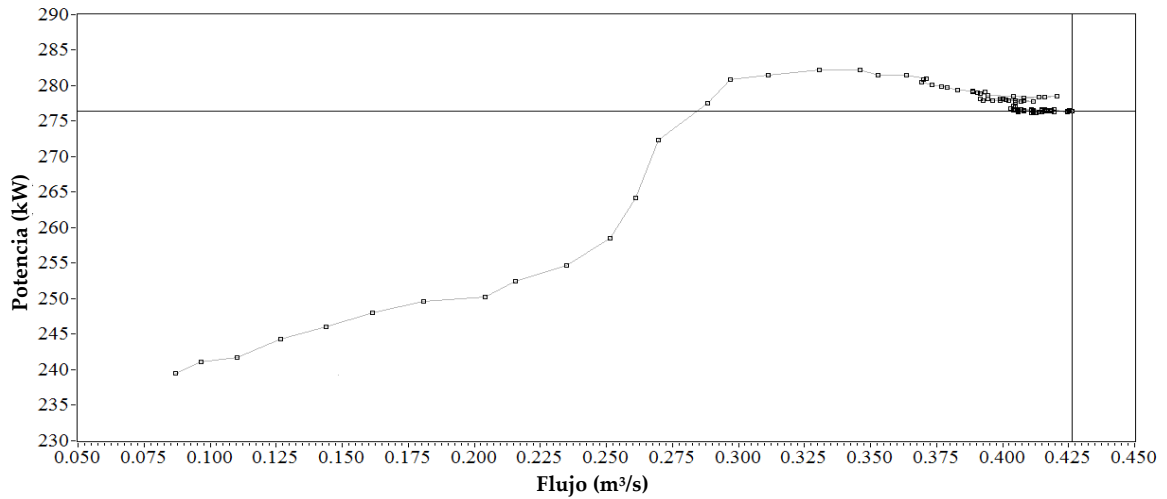


Figura 35. Curva de potencia en función del flujo, obtenida con MPB. Fuente: elaboración propia.

De la Figura 35, el promedio de los últimos 20 registros cuando la válvula de mariposa está completamente abierta es de 1,476 m<sup>3</sup>/h (0.41 m<sup>3</sup>/s) con una potencia de 276 kW equivalentes a un BHP de 259.44 kW, porque la eficiencia nominal de la bomba del motor es 0.94. Según el BEP del fabricante, el BHP debe ser de 279 kW, por lo tanto, se presenta una diferencia del 7.01%. Además, el índice de flujo tiene una caída estimada de 336 m<sup>3</sup>/h o 18.54% con respecto al estado óptimo.

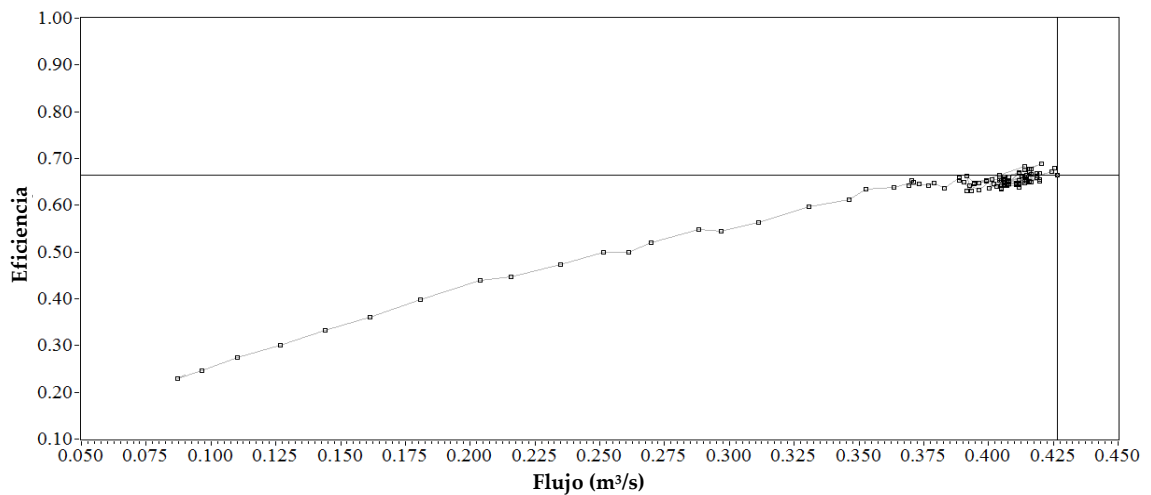


Figura 36. Curva de eficiencia en función del flujo, obtenida con MPB. Fuente: elaboración propia.

La Figura 36 muestra una dispersión de puntos establecida que se asemeja a una línea recta, que indica que la eficiencia varía casi proporcionalmente con la velocidad de agua. El promedio de los últimos 20 puntos de datos de eficiencia es del 65%, pero el BEP del fabricante afirma el 82%, por lo tanto, la bomba está trabajando con una caída del 20.73%.

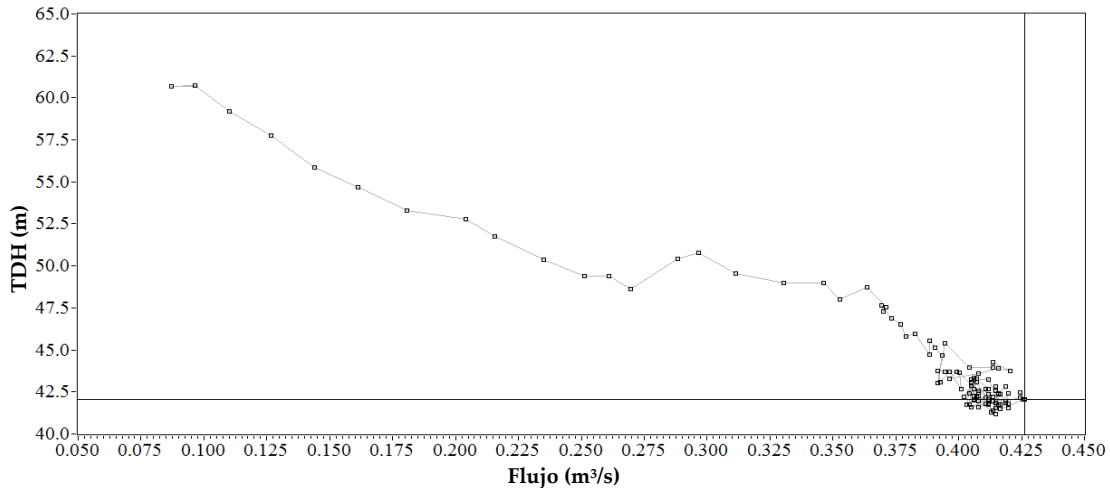


Figura 37. Curva de TDH en función del flujo, obtenida con MPB. Fuente: elaboración propia.

La Figura 37 muestra un conjunto de puntos de dispersión que representa una función lineal con una pendiente negativa; por lo tanto, el TDH disminuye cuando se aumenta el caudal. El promedio del TDH en los últimos 20 registros es 41.5 m a 1,476 m³/h (0.417 m³/s). Según el BEP del fabricante, debería ser de 44.8 m, por lo tanto, la carga presenta una caída del 6.69%.

El instrumento virtual MPB permite la cuantificación en tiempo real del comportamiento hidráulico de la bomba durante su funcionamiento. Usando los resultados de MPB, la información puede procesarse de forma sencilla para ser utilizada por diferentes proyectos de gestión de la eficiencia como sigue:

Suponiendo que la bomba en estudio trabaja continuamente 4,380 h/año (medio año) demandando la misma potencia eléctrica. Se puede estimar el consumo específico de EnE por unidad de volumen de agua bombeada. Este enfoque se aplica al estado de trabajo real y al estado BEP del fabricante de la siguiente manera:

$$\text{Indicador de rendimiento} = \text{Flujo/potencia nominal} \dots\dots (1)$$

$$\text{Indicador de rendimiento obtenido} = 1,476 \text{ m}^3/\text{h}/276 \text{ kW} = 5.348 \text{ m}^3/\text{kWh}$$

$$\begin{aligned} \text{Indicador de rendimiento BEP del fabricante} &= 1,812 \text{ m}^3/\text{h}/279 \text{ kW} \\ &= \underline{6.495 \text{ m}^3/\text{kWh}} \end{aligned}$$

El caso de estudio se describe como una empresa para el servicio de bombeo de agua en Mexicali. Por lo tanto, el costo de la EnE se relaciona con el esquema de cobro concerniente a la tarifa 5A. Si la bomba se puede restaurar en su rendimiento de diseño, el ahorro estimado con un precio medio de EnE según la Figura 3 es de:

$$\begin{aligned} \text{Ahorro de EnE} &= \text{Precio de EnE} \times \text{Índice de flujo BEP} \times \text{Período operativo} \times \\ &\text{Coeficiente de carga} \times [(1 / \text{Rendimiento obtenido}) - (1 / \text{Rendimiento del} \\ &\text{BEP})] \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ahorro de EnE} &= \$ 2.84 \text{ MXN/ kWh} \times 1,812 \text{ m}^3/\text{h} \times 4,380 \text{ h / año} \times 1 \times [1 / \\ &(5.348 \text{ m}^3/\text{kWh})] - [1 / (6.495 \text{ m}^3/\text{kWh})] \end{aligned}$$

$$\text{Ahorro de energía} = \underline{\$ 744,292.27 \text{ MXN/año.}}$$

La huella de carbono es estimada mediante la relación de consumo de EnE proveniente de centrales eléctricas convencionales con la emisión de toneladas de dióxido de carbono equivalentes (CO<sub>2eq</sub>) que se emite a la atmósfera en un determinado intervalo de tiempo. Para este ejemplo, se determina calculando las

emisiones de CO<sub>2eq</sub> utilizando un factor de emisión de 454 kg de CO<sub>2eq</sub>/MWh [34], como sigue:

$$\text{Exceso de huella de carbono} = \text{Factor de emisión} \times \text{Flujo acorde al BEP} \times \text{Periodo operativo} \times \text{Coeficiente de carga} \left[ \left( \frac{1}{\text{Rendimiento obtenido}} \right) - \left( \frac{1}{\text{Rendimiento BEP}} \right) \right] \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{Exceso de huella de carbono} = [(454 \text{ kg de CO}_{2\text{eq}}/\text{MWh}) / 1,000] \times 1,812 \text{ m}^3/\text{h} \times 4,380 \text{ h/año} \times 1 \times [1 / (5.348 \text{ m}^3/\text{kWh})] - [1 / (6.495 \text{ m}^3/\text{kWh})]$$

$$\text{Exceso de huella de carbono} = \underline{118,982 \text{ kg de CO}_{2\text{eq}}/\text{año}}$$

El modelo de cálculo presentado permite al usuario calcular cuánta EnE suministrada se convierte en trabajo útil para el bombeo de agua. Los resultados muestran una pérdida de rendimiento energético del 17.66% de acuerdo a la ecuación (1). Esta pérdida se ve reflejada en el consumo de EnE y la huella de carbono como se puede observar en el desarrollo de las ecuaciones (2) y (3). Por lo tanto, la bomba requiere más Ene que la indicada por el estado BEP del fabricante y, corresponde a un rendimiento de bombeo deficiente. Las consecuencias son un costo anual adicional de EnE de \$ 744,292.27 MXN y una huella de carbono adicional de 118,982 kg de CO<sub>2eq</sub> por año.

La pérdida de rendimiento puede estar asociada con el envejecimiento de la bomba que produjo un desgaste excesivo del impulsor, entre otras causas. Las recomendaciones incluyen:

1. Aplicar la metodología propuesta a las bombas restantes para caracterizar cada elemento y poder seleccionar las bombas que obtengan la mayor eficiencia en el sistema de bombeo.
2. Determinar las bombas de baja eficiencia y analizar la factibilidad de: agregar variadores de velocidad, reemplazar los impulsores y/o volutas que

muestran signos de degradación, el control de fugas y pérdidas mecánicas y eléctricas en los motores e inclusive reemplazar el equipo de bombeo por uno más eficiente.

3. Administración del flujo de agua (Q) de acuerdo con la demanda horaria y estacional.

Finalmente, estos resultados deben ser utilizados por el gerente de la planta para identificar las mejoras del sistema de bombeo que producen el mayor beneficio económico y ambiental en relación a las inversiones.

## CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

---

Los SGEN son herramientas que se han popularizado alrededor del mundo debido a que con su efectiva aplicación, se reducen significativamente el pago de facturación del servicio eléctrico y la huella de carbono. Su aplicación es factible para todos los tipos de empresas, independientemente de las condiciones geográficas, culturales o sociales. Por lo tanto, los SGEN para el ahorro y uso eficiente de la EnE son recomendados para cualquier empresa e institución. Además, se pueden obtener beneficios adicionales como es el aumento del renombre social y se incrementa la posibilidad de obtener financiamientos como resultado de la contribución de la protección al medio ambiente.

En la actualidad, la mayoría de los proyectos de SGEN se enfocan a optimizar las operaciones mediante controles automáticos, pero descuidan a veces aspectos importantes sobre la confiabilidad del abastecimiento eléctrico como son: el desbalance de corrientes y las caídas de voltaje, los costos de la electricidad de acuerdo con el proveedor del servicio y la huella de carbono. Por esta razón se determinó que las herramientas y métodos que se ofrecen en el mercado presentan en cierto grado y manera una falta de practicidad y/o rentabilidad. Por ello, la solución que se desarrolla y que conforman las contribuciones originales más importantes de este trabajo, es la creación de nuevas metodologías compuestas por herramientas de monitoreo innovadores, prácticos y de bajo costo y modelos de diagnóstico sencillos de elaborar.

En relación a los objetivos planteados al inicio de esta investigación, se concluye lo siguiente:

Respecto a las metodologías:

1. Son más prácticas porque pueden ser utilizadas por empleados y administradores con una capacitación básica. Por ejemplo, SisAR proporciona en tiempo real datos sobre facturación actual y futura que pueden ser accedidos desde cualquier ubicación geográfica. MPB por su parte provee de datos en tiempo real sobre eficiencia de la bomba y las curvas OC, además, utiliza la tecnología RF para omitir el conexionado físico. Ambos presentan la información de forma amigable en una computadora por medio de indicadores numéricos y gráficos.
2. Son de bajo costo comparados con similares en el mercado, porque conllevan un ahorro estimado en la inversión del 50%. Además, con su aplicación se puede omitir el costo adicional de contratación de personal especializado externo para llevar a cabo la gestión.

De acuerdo con el uso de la tecnología de instrumentación virtual:

3. LabVIEW® fue utilizado para crear herramientas de monitoreo innovadoras capaces de satisfacer las necesidades de cada usuario.
4. Permite adaptarse a conveniencia a nuevos métodos y tecnologías emergentes.

En relación a las hipótesis planteadas al inicio de esta investigación:

1. Se acepta la primera hipótesis, debido a que es posible crear metodologías para los usuarios del sector comercial, industrial y de servicios. El marco de trabajo presentado permite satisfacer requerimientos distintos.
2. La segunda hipótesis es verdadera, ya que es posible el desarrollo de herramientas de monitoreo flexibles e innovadoras.
3. La tercera hipótesis también es verdadera, porque se adaptaron métodos de análisis convencionales para crear nuevos modelos de diagnóstico que

facilitarán la evaluación del uso de la EnE. Con esto, los operadores y administradores tendrán la capacidad de fungir como gestores.

Las metodologías desarrolladas tienen la capacidad de alentar a los interesados en la generación y seguimiento de políticas de ahorro mediante el uso de SGEN innovadores y de bajo costo. Además, se pueden crear conciencia de manera persuasiva, ya que permite cuantificar el impacto económico y ambiental del uso cotidiano de la EnE. Por lo tanto, prometen facilitar la gestión y potencializar la realización de proyectos afines.

Una cualidad interesante sobre SisAR y MPB es que son herramientas de monitoreo con componentes compatibles entre sí. Ambos instrumentos comparten el uso de varios elementos de hardware, como son el equipo de medición de parámetros eléctricos y pueden utilizar los mismos instrumentos de comunicación y la computadora. Además, la arquitectura de programación se encuentra abierta para agregar más canales de adquisición, más elementos de hardware o nuevas funciones de monitoreo. Por lo tanto, son herramientas flexibles cuyas funciones y características no son definitivas y en el documento sólo se describen las especificaciones de una primera versión.

Las herramientas de monitoreo fueron desarrolladas para ser fácil de instalación y uso. Para lograr esto, su diseño incluye las siguientes características:

1. Software de aplicación independiente que orquesta varios elementos de la interfaz de hardware, para realizar la gestión automática de datos.
2. Diseño basado en los resultados de las entrevistas realizadas al personal operativo.

3. Se utilizó equipo de medición no invasivo que no requiere de la interrupción de las actividades productivas durante la instalación. Además, son herramientas de monitoreo portátiles.

Además, el SisAR tiene la flexibilidad de trabajar con cualquier equipo de medición del mercado a través de la modificación de su programación.

## CONTINUIDAD Y TRABAJOS FUTUROS

---

La ventaja primordial de estos productos es su flexibilidad y programación amigable. Esto quiere decir que pueden ser reconfigurados con una relativa sencillez para convertirse en instrumentos con funciones adicionales o incluir etapas de potencia para la creación de los primeros prototipos de control. Por lo tanto, el previo desarrollo de SisAR y MPB facilitará la creación de nuevos productos en el futuro como pueden ser:

- Medición y adquisición telemétrica de datos de sensores de radiación solar, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento.
- Automatización y sistemas inteligentes.

Las metodologías fueron desarrolladas para los proyectos de gestión de EnE en la Universidad Autónoma del Estado de Baja California, campus Benito Juárez y en los sistemas de bombeo de una planta de tratamiento de agua en Mexicali, utilizando SisAR y MPB, respectivamente. La continuación de ambos proyectos es la entrega de las herramientas de monitoreo a los usuarios para dar inicio de manera formal a las actividades que conllevan los siguientes niveles de gestión. El primer paso consistirá en establecer lapsos de implementación de monitoreo más largos para garantizar la robustez de los productos obtenidos.

Finalmente, la inclusión en el mercado regional será uno de los objetivos que se busquen así como servicios integrales de ingeniería, suministro, instalación, puesta en marcha y capacitación. Además, el crecimiento del sector comercial, industrial y de servicios se verá acentuado en un futuro próximo y de igual manera el requerimiento de monitoreo y control de procesos. Esto abrirá nuevas

oportunidades de mercado. El seguimiento constante y servicio al cliente serán las propuestas de valor más importantes.

## REFERENCIAS

---

[1] Universidad Austral de Chile. Huella de carbono.

Disponible en: [https://www.uach.cl/procarbono/huella\\_de\\_carbono.html](https://www.uach.cl/procarbono/huella_de_carbono.html)

Accesado en Enero del 2017.

[2] Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE). Eficiencia Energética. 2015.

Disponible en:

[http://www.fide.org.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1](http://www.fide.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=1)

Accesado en Febrero del 2017.

[3] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). Sistemas de Gestión de la Energía. 2014.

Disponible en:

<https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/sistemas-de-gestion-de-la-energia>

Accesado en Febrero del 2017.

[4] G. Escrivá, C. Álvarez, E. Peñalvo

New indices to assess building energy efficiency at the use stage.

Energy and Buildings, 43 (2-3) (2011), pp. 476-484

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.012>

[5] Asociación Mexicana de Empresas de Gestión Energética (AMEXGEN). Sistemas de medición y monitoreo.

Disponible en: [http://www.amexgen.com.mx/?page\\_id=80](http://www.amexgen.com.mx/?page_id=80)

(Accesado en Febrero del 2017).

[6] Sistema de Información Energética (SIE). Usuarios de energía eléctrica por entidad federativa.

Disponible en: <http://sie.energia.gob.mx/movil.do?action=applyOptions>  
(Accesado en Noviembre 2017).

[7] Sistema de Información Energética (SIE). Usuarios de energía eléctrica por sector tarifario.

Disponible: <http://sie.energia.gob.mx/movil.do?action=temas&node=IIIA3>  
(Accesado en Diciembre 2017).

[8] Sistema de Información Energética (SIE). Ventas internas de energía eléctrica por sector tarifario.

Disponible en: <http://sie.energia.gob.mx> (Accesado en Diciembre del 2017).

[9] Sistema de Información Energética (SIE). Precios medios de energía eléctrica por sector tarifario.

Disponible en: <http://sie.energia.gob.mx> (Accesado en Diciembre del 2017).

[10] V. Marinakis, C. Karakosta, H. Doukas, S. Androulaki, P. sarras.

A building automation and control tool for remote and real time monitoring of energy consumption.

*Sustainable Cities and Society*, 6 (2013), pp. 11-15

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.06.003>

[11] T. Sharmin, M. Gül, X. Li, V. Ganev, I. Nikolaidis, M. Al-Hussein

Monitoring building energy consumption, thermal performance, and indoor air quality in a cold climate region.

*Sustainable Cities and Society*, 13 (2014), pp. 57-68

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.009>

[12] N. Haidar, M. Attia, S. Senouci, E. Aglzim, A. Kribeche, Z. Binti Asus  
New Consumer-Dependent Energy Management System to Reduce Cost  
and Carbon Impact in Smart Buildings  
*Sustainable Cities and Society* (2017)  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.033>

[13] M. Farrokhifar, F. Momayyezi, N. Sadoogi, A. Safari  
Real-time based approach for intelligent building energy management using  
dynamic price policies  
*Sustainable Cities and Society*, 37 (2018), pp. 85-92  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.011>

[14] H.U. Gökçe, K.U. Gökçe  
Holistic system architecture for energy efficient building operation  
*Sustainable Cities and Society*, 6 (2013), pp. 77-84  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.07.003>

[15] Sabogal, B.R.; Palacios, J.A.; Pantoja, C.L.  
Optimización de energía en sistemas de bombeo.  
*Infor. Téc.* 2013, 77, pp. 47-58.  
<https://doi.org/10.23850/22565035.44>

[16] Sunela, M.I.; Puust, R.  
Simple Visual Tool to Analyze Pump Battery Efficiencies for Various Pump  
Combinations.  
*Procedia Eng.* 2014, 89, pp. 525-532,  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.474>

[17] Quezada, J.C.; Flores, E.; Bautista, J.; Quezada, V.

Diseño e implementación de un Sistema de control y monitoreo basado en MMI-PLC para un pozo de agua potable.

*Ing. Investig. y Tecnol.* 2014, 15, 41-50.

<http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/numeros/2014/v15n1-05.pdf>

[18] Kaya, D.; Alptekin, E.; Suleyman, K.; Canka, F.; Salih, A.; Celik C.

Energy efficiency in pumps.

*Energ. Convers. and Manage.* **2008**, 49, 1662-1673,

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.11.010>

[19] Hydraulic Institute.

Flow modeling tools.

Disponible en:

<https://www.energy.gov/eere/amo/articles/pumping-system-assessment-tool>

(Accesado en Marzo del 2017).

[20] National Instruments (NI).

Boeing Measures Reduced Aircraft Noise Emissions With NI PXI and LabVIEW.

Disponible en: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-684> (Accesado en Enero del 2017).

[21] National Instruments (NI).

NASA Uses NI LabVIEW to Save Time, Reduce Costs in Automated Testing of Microshutters

Disponible en: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-632> (Accesado en Enero del 2017).

[22] National Instruments (NI).

Instrumentación Virtual para Pruebas de la Próxima Generación

Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/6134/es/>

Accesado en Enero del 2017.

[23] R. Ramos, R. Zlatev, B. Valdez, M. Stoytcheva, M. Carrillo, J. García

LabVIEW 2010 computer vision platform based virtual instrument and its application for pitting corrosion study

Journal of analytical methods in chemistry, volume 2013. Article id 193230, 8 pages

<http://doi.org/10.1155/2013/193230>

[24] A. Pineda.

Instrumentación virtual. Fundamentos de programación grafica con LabVIEW.

Editorial digital Tecnológico de Monterrey, 2013.

Disponible en:

<https://repositorio.itesm.mx/ortec/bitstream/11285/622433/1/ID355.pdf>

(Accesado en Febrero 2017).

[25] United Nations Environment Programme Sustainable Buildings & Climate Initiative (UNEP-SBCI).

Buildings and climate change: A summary for decision-makers.

UNEP-SBCI, Paris, France (2009).

Disponible en: <http://staging.unep.org/SBCI/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>

(Accesado en Enero 2017).

[26] Commission for Environmental Cooperation (CEC).

Green buildings in North America - Opportunities and challenges

CEC, Montreal, Canadá (2008), pp. 22, ISBN 2-923358-47-3

Disponible en:

<http://www.cec.org/islandora/en/item/2335-green-building-in-north-america-opportunities-and-challenges-en.pdf> (Accesado en Enero 2017).

[27] Hydraulic Institute (HI); Europump; U.S. Department of Energy (DOE).

Variable speed pumping: A guide to successful applications. Executive summary.

Disponible en:

[https://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/variable\\_speed\\_pumping.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/variable_speed_pumping.pdf) (Accesado en Febrero 2017).

[28] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía Eléctrica (CONUEE).

Agua y uso eficiente de la energía. 2013.

Disponible en:

[http://www.agua.unam.mx/jornadas2013/assets/resultados/10\\_energiaalimentos/gonzalez\\_cecilia.pdf](http://www.agua.unam.mx/jornadas2013/assets/resultados/10_energiaalimentos/gonzalez_cecilia.pdf) (Accesado en Octubre 2017).

[29] Pedraza, J.A.; Espino, C.

Estudio Integral de Sistemas de Bombeo de Agua Potable Municipal. 2011.

Ruiz, A., Feilbogen, E., Nieto, M.A., Sierra, M.E., Gomez, B.I., Velazquez, A., Eds.

CONUEE: DF, Mexico.

Disponible:

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200256/bombeoagua.pdf> (Accesado en Octubre 2017).

[30] Flores, L.

Segundo curso de Sistemas de Gestión de la Energía para Instalaciones Industriales del Sector Público. 2016. CONUEE: DF, México.

Disponible en:

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/115168/Indicadores\\_de\\_Desempe\\_o\\_Energetico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/115168/Indicadores_de_Desempe_o_Energetico.pdf) (Accesado en Octubre 2017).

[31] U.S. Department of Energy (DOE).

Energy Tips – Pumping systems: Control Strategies for Centrifugal Pumps with Variable Flow Rate Requirements.

DOE: Washington, DC, USA, 2007; p.1.

Disponible:

[https://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/centrifug\\_pumps\\_control.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/centrifug_pumps_control.pdf) (Accesado en Octubre 2017).

[32] Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Evaluación para sistemas de bombeo de agua: Manual de eficiencia energética.

Washington; DC, 2011.

Disponible en: <http://www20.iadb.org/intal/catalogo/PE/2011/08952.pdf>

(Accesado en Febrero 2017).

[33] Comisión Federal de Electricidad (CFE). Tarifa HM.

Disponible:

[https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas\\_industria.asp](https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_industria.asp) (Accesado en Febrero 2017).

[34] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Aviso para el reporte nacional de emisiones. México, D.F. Octubre del 2015

Disponible en:

[http://www.geimexico.org/image/2015/aviso\\_factor\\_de\\_emision\\_electrico%202014%20Semarnat.pdf](http://www.geimexico.org/image/2015/aviso_factor_de_emision_electrico%202014%20Semarnat.pdf) (Accesado en Octubre 2017).

[35] T.C. Green y M. Prodanovic.

Control of inverter-based micro-grid

Electric Power Systems Research, Volume 77, Issue 9, July 2007, Pages 1204-1213.

<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.08.017>

[36] L. Fan, Z. Miao, y A. Domijan.

Impact of Unbalanced Grid Conditions on PV Systems. IEEE. 2010.

Disponible:

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5589695>

(Accesado en Octubre 2017).

[37] L.I., Ruiz.

Voltage drop?: concept, causes and effects in an industrial power system.

Proceedings of the 2015 IEEE thirty fifth Central American and Panamá Convention (Concapan XXXV).

Disponible

en:

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7428501&tag=1>

(Accesado en Noviembre 2017).

[38] Diaria Oficial de la Federación (DOF).

NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones eléctricas. (2012).

[http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5261457&fecha=27/07/2012](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5261457&fecha=27/07/2012)

(Accesado en Septiembre 2017).

[39] F.J., Ruiz; J.C., Hernández; F., Jurado.

Voltage unbalance assessment in secondary radial distribution networks with single-phase photovoltaic systems.

International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Volumen 64, Enero 2015, P.p. 646-654.

# ANEXOS

**Anexo A.** Artículo del autor de esta tesis publicado en la revista Sustainable Cities and Society de la editorial ELSEVIER. El factor de impacto de esta revista según el Journal Citation Report (JCR) era de 1.777 al momento de la publicación.

Sustainable Cities and Society 39 (2018) 155–162

---



Contents lists available at ScienceDirect

## Sustainable Cities and Society

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scs](http://www.elsevier.com/locate/scs)



---

### Practical and low-cost monitoring tool for building energy management systems using virtual instrumentation



Diego Bonilla<sup>a</sup>, Margarita Gil Samaniego<sup>b,\*</sup>, Rogelio Ramos<sup>a</sup>, Héctor Campbell<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal, Col Insurgentes Este, Mexicali, Baja California, Mexico  
<sup>b</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal, Col Insurgentes Este, Mexicali, Baja California, 21280, Mexico

---

**ARTICLE INFO**

**Keywords:**  
BEMS  
Virtual instrument  
LabVIEW  
Electric energy  
Electricity costs  
Carbon footprint  
Building performance

**ABSTRACT**

Building Energy Management Systems (BEMS) have been acquiring greater importance in the world; nowadays are a novel trend, especially for building performance, electricity cost and carbon footprint. Actually, tools for BEMS present some technical and economical disadvantages for building managers; to overcome these limitations, a practical and cost-effective tool is presented. To achieve this, we propose a flexible, user-friendly and low-cost remote monitoring system called Virtual Energy Management System (VMS). This tool is based on virtual instrumentation and the graphical user interface is developed on the LabVIEW 2013<sup>®</sup> virtual programming platform. VMS displays and records on a computer the information of electrical parameters, electricity costs and carbon footprint; moreover, the user is allowed to visualize the monitoring display and access to records remotely through the internet. The VMS software was designed to be used by employees and building managers, so specialized personnel is not required. The validation was carried out in a building actually in use by the Autonomous University of the State of Baja California (UABC) located at Mexicali, Mexico. Results show that the total investment cost of a monitoring tool for BEMS can be reduced by 40% for small and medium buildings.

---

**1. Introduction**

Buildings use about 40% of global energy and contribute up to 30% of annual GHG emissions (UNEP-SBCI, 2009). If no action is taken, energy demand is expected to rise by 50% by 2050 (IEA, 2013). In Mexico, buildings account for 25% of the total electricity consumption and 20% of CO<sub>2</sub> emissions, below the United States with 68% and 38%, respectively (CEC, 2008). Within this sector and according to Mexico's Secretary of Energy (SENER), residential buildings are the main consumers of electricity with approximately 72% of the total (SENER, 2016). Therefore, homes will have the highest impact on the national electrical system related to population growth. Housing designers, developers, and owners search for ways to minimize the operating costs and environmental impacts of buildings, while also increasing their functionality and appeal to occupants, so "green" trends are becoming more common in the marketplace (Yuan, Farnham, & Emura, 2015).

In this context, the concept of Building Energy Management Systems (BEMS) is currently being applied in buildings. Taking into consideration the use of the building, this concept can be described as the

conjunction of techniques and methods necessary to improve its energy use, efficiency and performance (CONUEE, 2014). The application of BEMS is intended to lead the reductions in GHG emissions, the cost of energy, and other related environmental impacts.

Actually, BEMS projects are mainly oriented to optimize the building operations through automatic controls, but they neglect sometimes important aspects of the measurements in the electrical system, such as: current unbalance, voltage drops, power factor, load profile, electricity costs (according to the energy provider) and carbon footprint. According to Escrivá (Escrivá et al., 2011), the energy behavior characterization and quantification are the first steps towards the identification of actions to improve the energy use. It is valuable to monitor the current unbalance and the voltage drops because three-phase connected devices such as motors may not work properly, reducing their efficiency and operating life (Liu, McNamara, Shorten, & McLoone, 2014). The neutral current flow is also incremented as well as the energy losses, therefore, the reliability of the electrical system is affected.

---

Abbreviations: BEMS, building energy management system; VI, virtual Instrument; CO<sub>2</sub>, carbon dioxide; CO<sub>2</sub>eq, equivalent CO<sub>2</sub>; VMS, virtual energy management system; A/C, air conditioning; GHG, greenhouse gas; GUI, graphical user interface  
\* Corresponding author.  
E-mail addresses: [Diego.bonilla@uabc.edu.mx](mailto:Diego.bonilla@uabc.edu.mx) (D. Bonilla), [margarita.gil.samaniego.ramos@uabc.edu.mx](mailto:margarita.gil.samaniego.ramos@uabc.edu.mx) (M.G. Samaniego), [rmosi@uabc.edu.mx](mailto:rmosi@uabc.edu.mx) (R. Ramos), [hcampbell@uabc.edu.mx](mailto:hcampbell@uabc.edu.mx) (H. Campbell).

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.009>  
Received 10 July 2017; Received in revised form 7 February 2018; Accepted 10 February 2018  
Available online 15 February 2018  
2210-6707/ © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Anexo B. Documento probatorio ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR) correspondiente a la aplicación de software denominada SisAR.**

**CERTIFICADO**

---

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

**AUTOR:** BONILLA GARCIA DIEGO RAMON  
**TITULO:** SISAR  
**RAMA:** PROGRAMAS DE COMPUTACION  
**TITULAR:** BONILLA GARCIA DIEGO RAMON

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

---

**Número de Registro:** 03-2017-012613294400-01

---

México D.F., a 31 de enero de 2017

**SUBDIRECTOR DE REGISTRO DE OBRAS Y CONTRATOS**

  
**DANIEL RAMOS LOPEZ**

  
**SECRETARÍA DE CULTURA**  
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR  
DIRECCIÓN DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

  
**CULTURA**  
SECRETARÍA DE CULTURA



  
INDAUTOR  
Instituto Nacional del Derecho de Autor

Anexo C. Documento probatorio ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR) correspondiente a la aplicación de software denominada MPB.

**CERTIFICADO**

---

**Registro Público del Derecho de Autor**

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

**AUTORES:** BONILLA GARCIA DIEGO RAMON  
GIL SAMANIEGO RAMOS MARGARITA

**TITULO:** MPB

**RAMA:** PROGRAMAS DE COMPUTACION

**TITULARES:** BONILLA GARCIA DIEGO RAMON  
GIL SAMANIEGO RAMOS MARGARITA

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

---


**Número de Registro:** 03-2017-121912432600-01

---

México D.F., a 15 de enero de 2018


EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR


JESUS PARETS GOMEZ

  
SECRETARÍA DE CULTURA  
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR  
DIRECCIÓN DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

MAR *ACL*

**CULTURA**  
SECRETARÍA DE CULTURA



  
INDAUTOR  
Instituto Nacional del Derecho de Autor

Anexo D. Carta de intención correspondiente al proyecto de gestión energética en UABC.

## Universidad Autónoma de Baja California

### INSTITUTO DE INGENIERÍA

2017 año del 60 Aniversario de la Universidad Autónoma de Baja California

Asunto: Constancia

#### A QUIEN CORRESPONDA:

La que suscribe, Directora del Instituto de Ingeniería, Campus Mexicali, dependiente de la Universidad Autónoma de Baja California, por medio de la presente hace constar: que de octubre de 2015 a la fecha se desarrolla en la UABC un programa de "**GESTIÓN ENERGÉTICA EN LA UABC**" el cual toma como ejemplo el Campus Benito Juárez. En este programa se han desarrollado varias acciones para el ahorro y uso eficiente de energía como lo son cambios de horarios en el período de verano de 2016 y 2017, Mediciones y prueba de un sistema de monitoreo en el Edificio de Vicerrectoría, Estimación de Facturación en Ciencias Agrícolas y actualmente se trabaja en los planes para incorporar a la UABC en los aspectos de nuevas tarifas y proyectos de plantas solares. Estas acciones han generado ahorros importantes en la Facturación de Energía Eléctrica para la UABC. El investigador responsable ante la UABC es el **Dr. Héctor Enrique Campbell Ramírez. Además cuenta con la participación de los siguientes investigadores y estudiantes:**

#### Investigadores

Dra. Gisela Montero Alpírez  
Dr. Carlos Pérez Tello

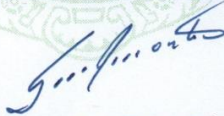
#### Estudiantes

M.I. Adán Alberto Jumilla Corral (doctorado)  
M.I. Diego Ramón Bonilla García (Doctorado)

A petición de los interesados y para los efectos legales a que haya lugar, se extiende la presente en la ciudad de Mexicali, Estado de Baja California, al décimo día del mes enero del año 2018.

ATENTAMENTE

"POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL HOMBRE"



DRA. GISELA MONTERO ALPÍREZ  
DIRECTORA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE BAJA CALIFORNIA



INSTITUTO DE  
INGENIERÍA

C.c.p Dr. Marcos Coronado Ortega. Coordinador de Posgrado e Investigación. Instituto de Ingeniería  
C.c.p Archivo

Anexo E. Carta de intención correspondiente al proyecto de gestión de EnE en sistemas de bombeo.

 <b>CESPM</b> Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali	 <b>BAJACALIFORNIA</b> GOBIERNO DEL ESTADO
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

SUBDIRECCIÓN	SUBDIRECCION DE AGUA Y SANEAMIENTO
ÁREA	POTABILIZACION
OFICIO	DG-1406-17
FOLIO	285698
LUGAR Y FECHA	MEXICALI, B.C. A. 13 DE SEPTIEMBRE 2017

**Dr. Daniel Hernández Balbuena.**  
**Director de la Facultad de Ingeniería de la**  
**Universidad Autónoma de Baja California.**  
**Presente.-**

Por medio de la presente, hago constar que el día 06 de Julio de 2017, la Dra. Margarita Gil Samaniego Ramos, profesora investigadora de la UABC, el M. I. Diego Bonilla García, estudiante de doctorado y el Ing. Vicente Navarro Ramírez, estudiante de maestría, ambos de la UABC, presentaron en las instalaciones de la CESPM ante los ingenieros encargados de las Plantas Potabilizadoras, los resultados del proyecto "La Interrelación entre el agua y la Energía y su impacto en la sustentabilidad".

También le comento que el producto asociado al proyecto, un Sistema de Diagnóstico y Evaluación de los sistemas de bombeo resultó de interés para nuestro Organismo, pues demostró el desempeño hidráulico y energético de los equipos de bombeo en tiempo real, con el fin de optimizar su consumo de energía y los costos asociados a la operación de los mismos.

Sin otro particular, quedo de usted.

**ATENTAMENTE**

  
**Ing. Francisco Javier Paredes Rodríguez**  
**Director General**

Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali  
**ESPACHADO**  
SEP 20 2017  
**ESPACHADO**  
DIRECCIÓN GENERAL  
Mexicali B.C.

C.c.p.- Ing. Isaac David Vizcueta Herrera.- Subdirector de Agua y Saneamiento.  
C.c.p.- Ing. María Guadalupe Vega Sánchez.- Jefe del Depto. de Potabilización.  
Archivo.

Calzada Independencia y Río Sinaloa No. 1399, Col. Vallarta, C.P. 21270 Mexicali Baja California México.  
[www.cespm.gob.mx](http://www.cespm.gob.mx) TEL: 564-1900