

# Electrical Energy Consumption Monitoring System in the Residential Sector using IoT

V. Sámano-Ortega, H. Méndez-Guzmán, J. Martínez-Nolasco, J. Padilla-Medina, *Member, IEEE*, M. Santoyo-Mora and J. Zavala-Villalpando

**Abstract**— In Latin America and the Caribbean, the consumption of energy, that comes mainly from fossil resources, have carried an increase in the air pollution. Electricity generation and its consumption in residential sector contributes to this problem with a significant percentage. On the other hand, recent research has demonstrated that the use of smart energy meters in developed countries reduces the electricity consumption due the continuous feedback gave to the consumer. This research presents the developing and implementation of an electrical energy consumption monitoring system based on smart sensors with IoT technology. The system calculates the instant power and the electrical efficiency as well as the energy consumed and its cost. The information of these variables is processed and transferred through a WIFI ESP8266 module to a ThingSpeak server that works like a cloud database. Also, an Android mobile application that interacts directly with the database was developed to users visualize the variables behavior. For validate the smart sensor accuracy its measures were compared with the measures of an oscilloscope and a multimeter. Relative errors between -2.34 and 1.92 % were observed.

**Index Terms**— Electrical energy consumption, Monitoring system, Internet of Things, Mobile application.

## I. INTRODUCCIÓN

Entre 1970 y 2019 el suministro de energía primaria en la Región de Latinoamérica y el Caribe (LAyC) aumentó en 2.48 veces, de 2.287 a 5.669 billones de barriles equivalentes de petróleo. Sin embargo, en 2019 el 70% de esta energía provino de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón). También las emisiones de gases de efecto invernadero

aumentaron en esta región, teniendo un crecimiento del 80 % entre 1990 y 2018 [1]. En LAyC el 48% de la contaminación del aire se atribuye a los procesos de producción de calor y generación de electricidad [2], mientras que aproximadamente el 25% de energía eléctrica se consume en el sector residencial [3].

Por otro lado, el uso de medidores automáticos, infraestructuras avanzadas de medición o medidores inteligentes de energía eléctrica permite a los usuarios monitorear en tiempo real el consumo de energía en su residencia, con lo que eventualmente se ven motivados a disminuirlo para ahorrar dinero. Esta premisa se comprueba con estudios que sugieren que el consumo de energía a nivel residencial se reduce cuando se da una retroalimentación en tiempo real al consumidor; esto en comparación con la retroalimentación que se da de forma periódica con la factura de la energía [4]. En [5] se encontró que la retroalimentación en tiempo real reduce el consumo de energía eléctrica un 20% en promedio. En este experimento, desarrollado en Texel (Países Bajos), los usuarios contaban con una pantalla instalada en sus hogares que proporcionaba información sobre su consumo. En [6] se describe un experimento desarrollado en Colombia en el que los usuarios fueron retroalimentados con un reporte semanal sobre su consumo de agua y electricidad. Esta retroalimentación produjo una reducción en el consumo de la energía eléctrica. En [7] se presentan los resultados de un experimento realizado en el Puerto Real de Estocolmo (Suecia) en el que los usuarios contaban con retroalimentación sobre su consumo en una pantalla instalada en sus hogares o bien a través de una APP móvil. En este experimento se observó una reducción promedio de 9.7 % en el consumo de electricidad. En [8] se realizó un experimento en el que los huéspedes de 6 hoteles en Suiza recibían retroalimentación sobre la cantidad de agua y energía consumida durante un baño (en tiempo real mientras se bañaban) a través de una pantalla instalada debajo de la regadera. Los huéspedes que recibieron retroalimentación redujeron su consumo 0.215 kWh en cada baño. Sin embargo, la implementación de este tipo de medidores en países en desarrollo no es viable debido a su costo [4].

En la actual era del Internet de las Cosas (IoT) los sensores en conjunto con el internet proporcionan soluciones a múltiples problemas de la vida real. Entre la aplicación de estos sensores IoT, o sensores inteligentes, se encuentran: ciudades inteligentes, sistemas inteligentes para el cuidado de la salud, sistemas de transporte y edificios inteligentes [9]. En la rama de

V. M. Sámano-Ortega, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Celaya 38010, México (e-mail: d2003009@itcelaya.edu.mx).

H. A. Méndez-Guzmán, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Celaya 38010, México (e-mail: d2003027@itcelaya.edu.mx).

J. J. Martínez-Nolasco, Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Celaya 38010, México (e-mail: juan.martínez@itcelaya.edu.mx).

J. A. Padilla-Medina, Departamento de Ingeniería Electrónica, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Celaya 38010, México (e-mail: alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx).

M. Santoyo-Mora, Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Celaya 38010, México (e-mail: mauro.santoyo@itcelaya.edu.mx).

J. G. Zavala-Villalpando, Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Celaya 38010, México (e-mail: jg.zavala@itcelaya.edu.mx).

edificios inteligentes la incorporación de IoT atiende campos como confort, cuidado de la salud, seguridad y eficiencia energética [10]. En investigaciones recientes, estos sensores se emplean para integrar sistemas de monitoreo de energía. En [11] se propone un sistema de adquisición de datos con IoT aplicado a un sistema fotovoltaico de bombeo de agua. El sistema propuesto está conformado por sensores de voltaje, corriente, radiación, temperatura, humedad, presión y flujo de agua, un convertidor analógico/digital basado en un microprocesador PIC18F2550, una Raspberry Pi y un servidor Web usando PHP y Apache, y una base de datos MySQL, así como la plataforma online Ustream para realizar el monitoreo visual. En [4] se presenta un sistema de monitoreo de energía de bajo costo basado en IoT. El sistema se conforma de nodos de monitoreo, un servidor local desarrollado con una Raspberry Pi y un servidor con una aplicación Web disponible para la visualización de la información. El monitoreo se realiza con nodos conformados por módulos PZEM-004T para la medición de la energía y módulos ESP8266 Wemos D1 mini para la transmisión inalámbrica de la información. El sistema monitorea y despliega valores de voltaje, corriente y potencia. En [12] se describe un sistema de monitoreo de consumo energético conformado por un sensor inalámbrico, un router y un servidor Web. El sensor se compone de un módulo PZEM-004T y una tarjeta de desarrollo ESP32, estos dos dispositivos se comunican entre sí mediante el protocolo UART TX/RX. En [13] se propone un sistema para el monitoreo del consumo de energía basado en IoT. El sistema se compone de un sensor inteligente conformado por un Arduino UNO, un sensor de efecto Hall ACS712 y un módulo ESP8266, así como el servidor ThingSpeak. El sistema propuesto monitorea la potencia instantánea y la energía consumida. En [14] se presenta un sistema de monitoreo de energía compuesto por medidores Schneider y Elmeasure, una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi, un servidor en la nube con una base de datos y aplicaciones de control y monitoreo. Los medidores industriales utilizados se comunican con la tarjeta de desarrollo empleando el protocolo serial RS-485 y permiten monitorear más de 60 parámetros eléctricos. En [15] se propone un sistema de administración de energía para casas inteligentes basado en IoT. El sistema está compuesto por un controlador NodeMCU con comunicación WiFi, módulos de medición y control de energía basados en controladores Arduino Pro Mini y el servidor Blynk. Los módulos de medición y control integran sensores de corriente, voltaje, un módulo RF NRF24L01, una fuente de alimentación y un relevador. En [16] se propone un sistema de administración de energía residencial basado en IoT. El sistema colecta información de múltiples dispositivos y sensores, la analiza, detecta patrones de consumo y da recomendaciones al

usuario para ahorrar energía. Los resultados muestran que las recomendaciones contribuyeron al ahorro de entre 42 y 90 kWh por bimestre. Finalmente, en [17] se presenta un sistema basado en IoT para generar conciencia sobre el comportamiento en el consumo de energía en edificios comerciales. El sistema reconoce a cada ocupante del edificio mediante la conexión de su teléfono a la red del lugar, emplea Deep Learning para identificar su consumo de energía y le envía una retroalimentación personalizada. Los resultados mostraron una reducción de energía promedio de 34% con la implementación de este sistema.

En este artículo se presenta el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo del consumo de energía eléctrica en el sector residencial utilizando tecnología de IoT. Las principales ventajas de este sistema se listan a continuación:

- Es un sistema de bajo costo.
- Incluye un algoritmo que calcula el costo de la energía consumida en base a una fecha y un costo por kWh definidos por el usuario.
- Incluye una APP que permite al usuario monitorear su consumo de forma remota a través de una interfaz gráfica.

Este artículo se divide en 4 secciones, la sección I corresponde a la introducción, en la sección II se describe el sistema de monitoreo y cada una de sus partes, en la sección III se presentan los resultados y finalmente, la sección IV incluye las conclusiones de la investigación.

## II. SISTEMA DE MONITOREO DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Como se muestra en la Fig. 1, el sistema de monitoreo de consumo de energía eléctrica está integrado por tres elementos: 1) un sensor inteligente, 2) el servidor ThingSpeak, y 3) una APP para monitoreo remoto desarrollada en Android Studio. El sensor inteligente consta de dos partes: una etapa para la medición de voltaje y corriente en la carga, que incluye sensores y acondicionadores de señal, así como un microcontrolador que calcula el voltaje y corriente RMS, la potencia y la eficiencia eléctrica de la carga; además, envía la información de estas variables al servidor de ThingSpeak mediante un módulo ESP8266 (ESP). En el servidor se almacena y organiza una base de datos con la información subida por el sensor con la finalidad de evaluar la energía consumida y el costo de esta. El consumo energético de la carga se monitorea mediante la plataforma de ThingSpeak, la cual permite visualizar de forma gráfica los históricos de cada variable o bien a través de la APP desarrollada.



Fig. 1. Sistema de monitoreo del consumo de energía eléctrica mediante IoT.

### A. Sensor Inteligente

En la Fig. 2 se muestra un diagrama esquemático del sensor inteligente, este tiene tres funciones: 1) realiza la medición y acondicionamiento de las señales de corriente y voltaje de la carga a la que se conecta, 2) calcula el voltaje y corriente RMS, la potencia instantánea y la eficiencia eléctrica empleando un microcontrolador ( $\mu C$  en la Fig. 2) y 3) las variables calculadas se envían a una base de datos en la nube a través de un módulo ESP8266 cada 16 segundos. Para la medición de voltaje y corriente de forma no invasiva se utilizaron un amplificador diferencial con aislamiento HCPL-7800 [18] y un sensor SCT-013-000 (TC en la Fig. 2) [19]. Las señales eléctricas proporcionadas por los sensores son filtradas y normalizadas a una escala de 0 a 5 V con un offset de 2.5 V, esto se consigue mediante las ganancias  $k_1$  y  $k_2$  y los puntos suma mostrados en la Fig. 2. El cálculo de la eficiencia eléctrica del electrodoméstico depende del desfase entre las señales de voltaje y corriente, para medir esta variable el sensor integra detectores de cruce por cero (DCC en la Fig. 2).

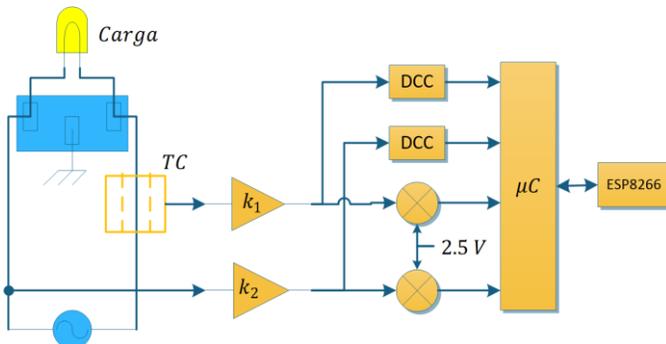


Fig. 2. Diagrama esquemático del sensor inteligente.

Para la calibración del sensor inteligente se compararon las mediciones de corriente, voltaje y ángulo de fase con las mediciones obtenidas con un osciloscopio. Para este proceso el sensor cuenta con constantes modificables en firmware y un potenciómetro interno. Además, el conductor que alimenta a la carga se enrolla en el sensor de corriente, esto permite modificar el rango de medición del sensor inteligente en función del número de espiras, estos rangos son: 0-20 A, 0-30 A, 0-50 A y 0-100 A, posibilitando adaptar el sensor a diferentes cargas residenciales.

El sensor se diseñó de modo que el electrodoméstico se conecte a este como se haría en un contacto de pared convencional sin la necesidad de alterar su cableado.

### B. Servidor

En el servidor ThingSpeak se cuenta con una base de datos que almacena la información subida, mediante peticiones HTTP, por el sensor inteligente. Con esta información se calcula la energía consumida y su costo, haciendo uso de una aplicación de análisis. Adicionalmente, a partir del desfase entre el voltaje y la corriente, el sensor inteligente calcula y almacena los valores de ángulo de fase y factor de potencia, necesarios para el cálculo de la eficiencia eléctrica. Con esta información se genera en el servidor una representación gráfica del desfase para un ciclo de la red. Cada variable almacenada en el servidor puede ser visualizada a través de una página Web disponible en ThingSpeak, la cual cuenta con un formato gráfico de series de tiempo.

Para el cálculo de la energía consumida y su costo se desarrolló un algoritmo que se ejecuta cada 24 horas. Inicialmente se recupera la información correspondiente a la potencia del electrodoméstico en las últimas 24 horas,  $P|_{24h}$ , la fecha del último día de corte para la facturación de la energía,  $f_c$ , y el costo de la energía por kWh,  $C_{kWh}$ ; la fecha de corte y el costo son agregados por el usuario a través de la APP. La variable  $P|_{24h}$  se integra, con la regla del trapecio [20], obteniendo la energía consumida por el electrodoméstico en las últimas 24 horas,  $E_d$ . Posteriormente, se recuperan los valores calculados para  $E_d$  en los días anteriores y hasta después de la fecha de corte,  $E_{d_j}$ , estos valores se suman y se le agrega la energía del día obteniendo la potencia consumida total desde la fecha de corte hasta el momento  $E_T$ . Finalmente, el costo de la energía,  $C_T$ , se obtiene multiplicando la energía por  $C_{kWh}$  y se obtienen valores promedio para la energía y el costo,  $\bar{E}$  y  $\bar{C}$  respectivamente, dividiendo el valor total entre el número de días transcurridos desde la fecha de corte incluido el actual,  $D_c + 1$ . Para desarrollar este algoritmo se emplean 3 canales de la base de datos. El algoritmo desarrollado para el cálculo de la energía se muestra en la Fig. 3.

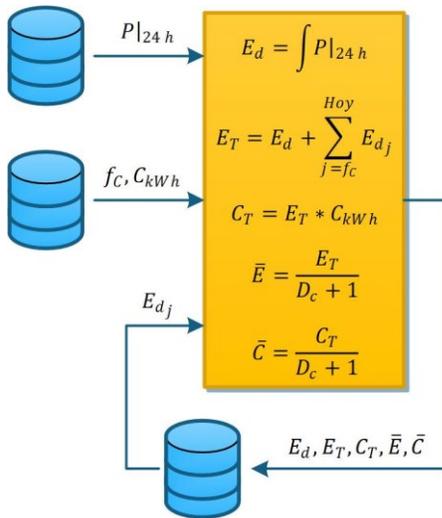


Fig. 3. Algoritmo para el cálculo de la energía y su costo.

El uso del servidor ThingSpeak está limitado en el número de mensajes enviados y la frecuencia con que se envían. Un mensaje se define como la escritura de información en un canal, pero no como la descarga de dicha información. De modo que el sistema está limitado en cuanto al número de sensores que envían información al servidor, pero no en cuanto al número de usuarios que pueden consultarla. El aumento en el número de sensores requeriría ampliar la licencia o bien, disponer de una capa intermedia que administre un conjunto de sensores y suba la información en conjunto como si se tratase de un solo dispositivo.

### C. Aplicación Móvil

Se desarrolló una aplicación móvil en Android Studio para la visualización de las variables monitoreadas. Esta APP tiene tres ventanas principales mostradas en la Fig. 4: ventana de administración, ventana de credenciales y ventana de visualización. La ventana de administración permite al usuario gestionar la clave de acceso a la API del servidor (API Key) y la identificación del canal (Channel ID) donde se almacena la información, los cuales son necesarios para acceder a un canal de ThingSpeak. En esta ventana el usuario tiene las opciones de agregar y eliminar una cuenta o bien elegir una previamente almacenada en la memoria interna del dispositivo móvil. También, en esta ventana se tiene la opción de agregar la última fecha de corte de facturación de la energía y el costo por kWh. Si en la ventana de administración se elige agregar una nueva cuenta, la aplicación pasa a la ventana de credenciales, donde el usuario introduce una API Key y una Channel ID para ser almacenadas. Si por otro lado, desde la ventana de administración se selecciona agregar datos de facturación la aplicación pasa a la ventana de credenciales donde se da la opción al usuario de agregar una fecha de corte y el costo de la energía. Una vez seleccionado el canal a visualizar, la APP cambia a la ventana de visualización, enviando a ThingSpeak una petición HTTP para descargar los datos almacenados en la nube. Cuando la APP recibe la respuesta del servidor, permite seleccionar el campo y la cantidad de datos a visualizar, o bien acceder a las visualizaciones generadas en el servidor. Ante

cualquier modificación del campo o el número de datos a visualizar, el dispositivo móvil mantiene comunicación con el servidor para la descarga de la información.

El sistema de monitoreo está diseñado para proporcionar información a usuarios no necesariamente expertos sobre el consumo de electricidad de sus electrodomésticos, por lo que no todas las variables calculadas se incluyeron en la APP, pero si se visualizan en el sitio Web del servidor. Las variables que se visualizan en la APP son la energía consumida por cada día, la energía consumida total, la energía consumida promedio diaria, el costo generado por cada día, el costo total y el costo promedio diario.

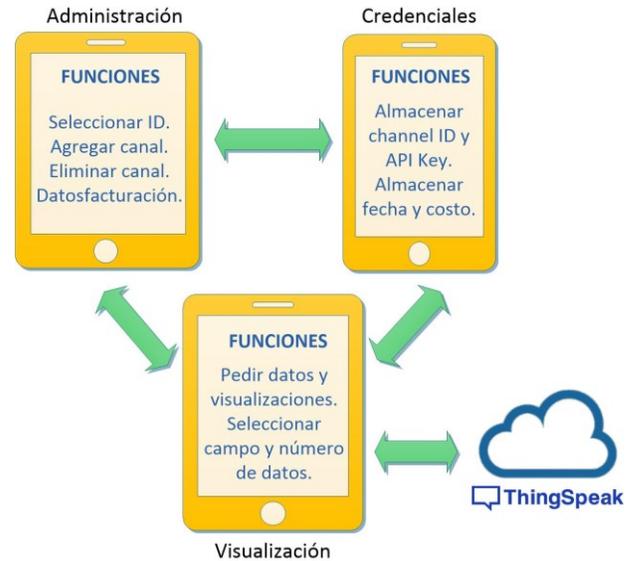


Fig. 4. Funcionamiento de la APP.

## III. RESULTADOS

El prototipo del sensor inteligente se validó realizando mediciones de voltaje, corriente, potencia y eficiencia eléctrica sobre una lámpara incandescente de 100 W, un refrigerador de 200 W y un ventilador de 49 W. Para cada uno de los electrodomésticos se obtuvieron 100 mediciones, estos valores se compararon con los obtenidos empleando un osciloscopio y un multímetro digital. A continuación, se presenta el análisis de las mediciones realizadas.

### A. Validación Experimental

En la Tabla I se muestra el promedio de las mediciones realizadas por el sensor inteligente para las variables voltaje V, corriente I, potencia P y eficiencia eléctrica  $\eta$ , por cada uno de los electrodomésticos.

TABLA I  
MEDICIONES CON EL SENSOR INTELIGENTE

Carga	V (V)	I (A)	P (W)	$\eta$ (%)
Lámpara Incandescente	124.3	0.78	97.69	100
Ventilador	119.99	0.48	58	93
Refrigerador	120.73	1.84	217	97

Por otra parte, en la Tabla II se muestran el promedio de las

mediciones adquiridas haciendo uso de instrumentos estándar para las mismas variables por cada uno de los electrodomésticos. Los valores de corriente y voltaje fueron adquiridos mediante un multímetro digital, mientras que la eficiencia eléctrica se calculó con el ángulo de desfase medido con un osciloscopio, a partir de los valores anteriores la potencia fue calculada.

TABLA II  
MEDICIONES CON INSTRUMENTOS ESTÁNDAR

Carga	V (V)	I (A)	P (W)	$\eta$ (%)
Lámpara Incandescente	123.98	0.77	95.46	100
Ventilador	119.35	0.48	57.28	93.6
Refrigerador	120.57	1.82	221.25	96.9

Para medir la discrepancia entre las mediciones del sensor y los instrumentos estándar se calculó el error relativo porcentual entre ellas. Para ello, las mediciones realizadas por medio de multímetro y osciloscopio fueron consideradas como el valor de referencia. El error relativo promedio obtenido se muestra en la Tabla III.

TABLA III  
ERROR RELATIVO

Carga	V (%)	I (%)	P (%)	$\eta$ (%)
Lámpara Incandescente	-0.26	-1.3	-2.34	0
Ventilador	-0.54	0	-1.26	0.64
Refrigerador	0.69	-1.1	1.92	-0.1

### B. Visualización de Datos en la APP

El usuario tiene dos opciones para visualizar los datos generados por el sensor inteligente: a través del sitio Web del servidor o mediante la APP desarrollada. En la Fig. 5 se muestran las tres ventanas de la APP descritas en la sección II. C. En el inciso a) se muestra la ventana de administración, en el inciso b) se muestra la ventana de credenciales cuando se selecciona agregar un nuevo canal, en el inciso c) la ventana de credenciales cuando se selecciona subir datos de facturación y en el inciso d) la ventana de visualización. Por otro lado, en la Fig. 6 se muestra un ejemplo de las visualizaciones obtenidas para el monitoreo del ventilador. En el inciso a) se muestra la energía consumida a la fecha, esta visualización incluye un indicador numérico, en el inciso b) la energía consumida por día y en el inciso c) el costo generado por día.

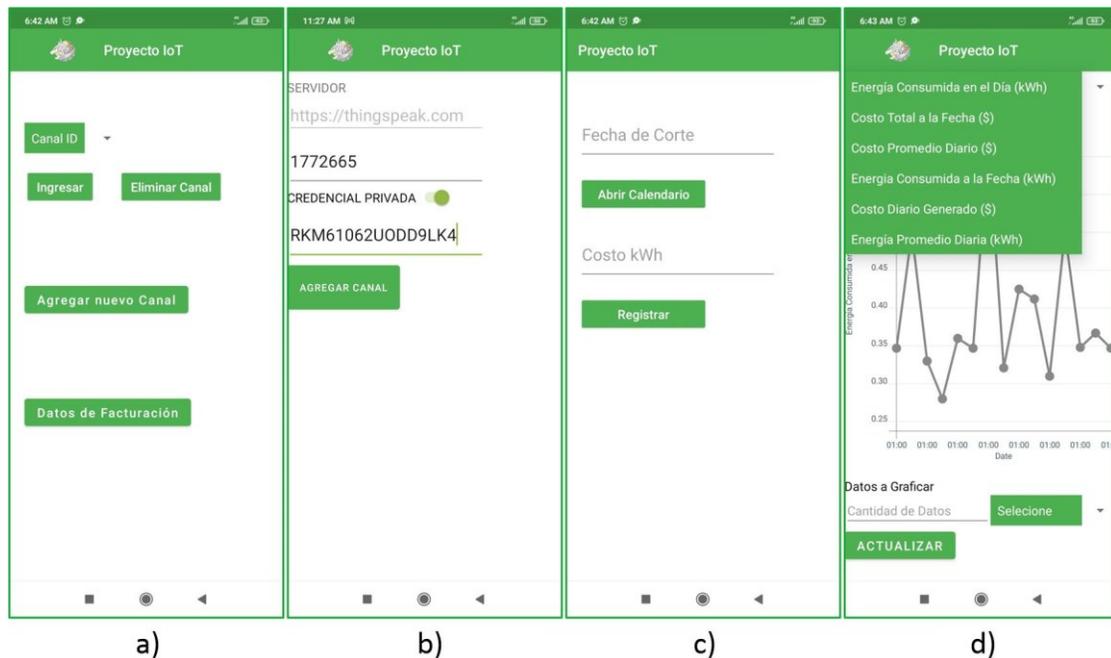


Fig. 5. Ventanas de aplicación de usuario.

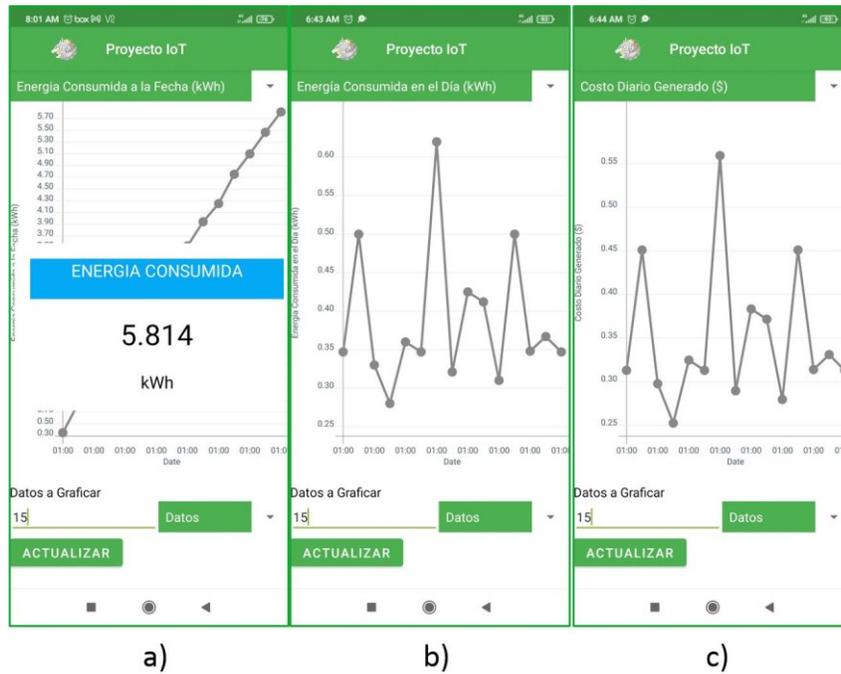


Fig. 6. Visualización de características de consumo en APP Android.

C. Visualización de Datos en el Servidor

En la Fig. 7 se muestra el comportamiento del consumo de energía de un ventilador de 49 W en el servidor de ThingSpeak con una tasa de actualización de 16 segundos. El monitoreo del consumo de energía se realizó solo para este electrodoméstico en un periodo comprendido del 1° al 15 de junio del 2022. En la región donde se realizó el monitoreo este periodo marca el final de la primavera, siendo una de las épocas más calurosas del año. En los incisos a) al f) se presentan, respectivamente, el voltaje, la corriente, la potencia, la eficiencia eléctrica, el

ángulo de fase y la representación gráfica del desfaseamiento. Finalmente, en la Fig. 8 se muestran el consumo diario de energía eléctrica, el costo diario de la energía, el consumo de energía total, el costo generado, el costo promedio diario y el consumo de energía promedio diario, en los incisos a) al f), respectivamente. Estos valores corresponden al monitoreo de 15 días de operación del ventilador durante los cuales este electrodoméstico se encendió durante aproximadamente 3 horas cada día. Para el cálculo del costo de la energía se consideró la tarifa 1C de la Comisión Federal de Electricidad, encargada del suministro eléctrico en México, en el rango de consumo básico en temporada de verano [21].

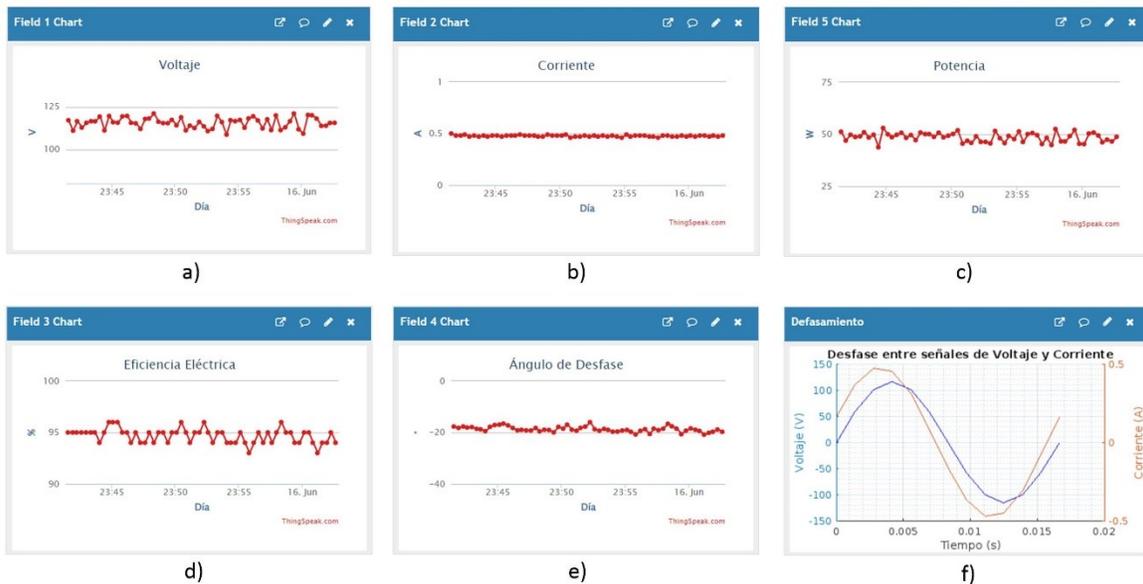


Fig. 7. Registro de consumo eléctrico de ventilador de 49 W en ThingSpeak.

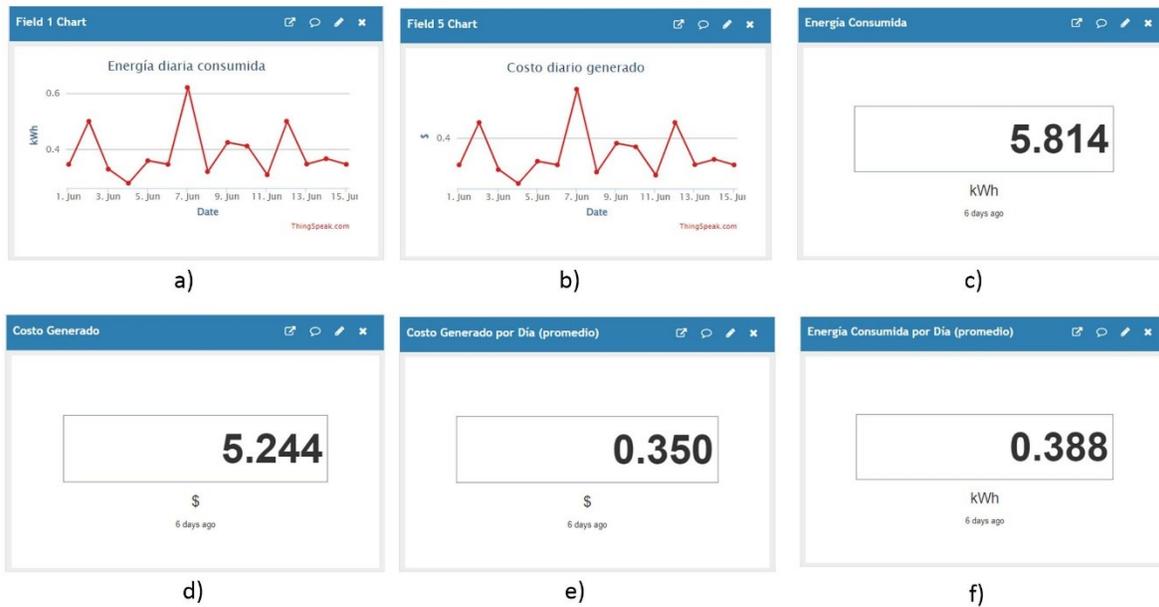


Fig. 8. Visualización de datos de consume en ThingSpeak.

#### IV. CONCLUSIONES

El sensor inteligente integrado en el sistema de monitoreo presentó errores relativos de entre -0.54 y 0.69 % para el voltaje, de entre -1.3 y 0% para la corriente, de entre -2.34 y 1.92 % para la potencia y de entre -0.1 y 0% para la eficiencia eléctrica. En todos los casos el valor absoluto de estos errores se encuentra por debajo del 2.5%, este error es similar a los reportados en los trabajos presentados en la introducción. En [11] se presentan errores absolutos de 0.49 V y 0.1 A para el voltaje y la corriente. En [4] se reporta un error menor al 5 %. Y en [13] se presentan errores relativos de entre 0.033 y 0.4498 %. Si bien el error obtenido en la energía consumida no se calculó en comparación con un instrumento estándar, este dependerá del error de la potencia y del método empleado para su integración. Dado que el error para la potencia está por debajo del 2.5% y que se empleó el método de los trapecios con un tiempo entre muestras relativamente corto, 16 segundos, no se espera que el error en el consumo de energía sea muy grande.

En los sistemas presentados en la introducción se calcula la energía consumida por la carga, sin embargo, en estos trabajos no se incluye una aproximación del costo que tendría esta energía y la referencia de tiempo a partir de la cual la energía que se acumula es fija. En el trabajo presentado en este artículo el usuario tiene la posibilidad de introducir la fecha de corte de su factura de energía eléctrica, así como el costo de la energía a través de la APP. Esta función permite aproximar la cantidad a pagar por el electrodoméstico monitoreado en la siguiente factura. Esta variable proporciona una retroalimentación más directa al consumidor en comparación con el resto de las variables eléctricas que el sistema calcula. El hecho de que la fecha de corte y el costo de la energía sean introducidas por el usuario proporciona flexibilidad al sistema para el cálculo del costo ante periodos de cobro y costos de la energía variables.

El sistema propuesto en este trabajo tiene la ventaja de incluir una APP en comparación con los trabajos presentados en [4],

[11], [12], [13] y [14]. Al incluir la APP el acceso a los datos de consumo de energía se realiza de forma más simple y a través de una interfaz diseñada para su visualización en dispositivos móviles.

En [4] se plantea el costo de los medidores inteligentes como una limitante para su aplicación en países en desarrollo. Por otro lado, en [4] y [11] se proponen sistemas de monitoreo de bajo costo, atribuyendo este rasgo al hecho de que las propuestas se integraron con hardware de bajo costo y software libre. El sistema desarrollado en esta investigación reúne ambas características por lo que también se considera, bajo esta perspectiva, una solución de bajo costo. Esto permite que el sistema sea aplicable en la región de LAYC.

Los sistemas presentados en [4] y [14] incluyen almacenamiento local, lo que garantiza que no se pierdan datos en caso de un fallo en la comunicación con el servidor en la nube. El sistema propuesto en este trabajo no incluye este elemento por lo que se propone integrar una capa intermedia entre el sensor y el servidor en la nube que incluya una base de datos local y una conexión directa con la APP como trabajo futuro.

En la Tabla IV se presenta un resumen de la comparativa entre los trabajos presentados en la introducción y la propuesta de este artículo. Los aspectos considerados en la comparativa son: a) el error en la medición, b) si el sistema incluye o no el cálculo del costo de la energía consumida, c) la forma en que se retroalimenta al usuario, d) si el sistema se plantea como uno de bajo costo o no y e) si el sistema incluye almacenamiento de forma local para la gestión de fallos en la conexión.

TABLA IV  
MEDICIONES CON INSTRUMENTOS ESTÁNDAR

Ref.	a	b	c	d	e
[4]	< 5%	NO	Monitor	SI	SI
[11]	0.49 V y 0.1 A	NO	Web	SI	NO
[12]	-	NO	Web	NO	NO
[13]	0.033% y 0.4498%	NO	Web	NO	NO
[14]	-	NO	Monitor	NO	SI
[15]	-	NO	APP	NO	NO
[16]	-	NO	APP	NO	NO
[17]	-	NO	APP	NO	NO
Propuesto	< 2.5%	SI	APP	SI	NO

En resumen, el sistema propuesto realiza la medición de las variables con un error similar al reportado en literatura y tiene las ventajas de incluir el cálculo del costo de la energía, presentar los resultados a través de una APP y ser una alternativa de bajo costo. Por otro lado, el sistema carece de una base de datos local siendo esta la principal área de oportunidad identificada.

En trabajos como [5], [6], [7], [8], [16] y [17] se evidencia una reducción en el consumo de energía empleando sistemas de monitoreo y retroalimentación del consumo de energía. El sistema presentado en este artículo se encuentra en una etapa de validación técnica ofreciendo ventajas como su bajo costo, el cálculo del costo de la energía y la retroalimentación al usuario mediante una APP móvil. Sin embargo, actualmente no se midió el efecto del sistema en la reducción del consumo de energía o la aceptación del sistema por parte de los usuarios. La investigación actual sugiere que el sistema es técnicamente viable para su aplicación en casas habitación por lo que se propone iniciar una segunda etapa midiendo los aspectos mencionados en más residencias. El principal reto que esta etapa supone es integrar múltiples sensores para la medición del consumo en todos los electrodomésticos de múltiples casas habitación. Entre las principales alternativas propuestas en literatura para la solución de esta problemática se encuentran el uso de un único sensor con un sistema inteligente para la detección de patrones de consumo de modo que no es necesario conectar un sensor por cada carga o bien, la implementación de una capa intermedia para gestionar múltiples sensores. Actualmente los detalles técnicos del despliegue de la siguiente etapa de nuestra investigación no están completamente definidos, pero seguirán alguna de estas tendencias.

#### REFERENCES

- [1] Statistics Division of the Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), "Energy in Latin America and the Caribbean: access, renewability and efficiency," no. 5, May. 2022. [Online]. Available: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47925/1/S2200272\\_en.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47925/1/S2200272_en.pdf)
- [2] M. Koengkan, J. A. Fuinhas, N. Silva, "Exploring the capacity of renewable energy consumption to reduce outdoor air pollution death rate in Latin America and the Caribbean region," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 2, pp. 1656-1674, Jan. 2021, doi: 10.1007/s11356-020-10503-x
- [3] R. Jimenez, A. Yépez-García, "Energy for Households: Summary and Recommendations," in *How do households consume energy?: evidence from Latin American and Caribbean*, IDB Publications (Books) Inter-American Development Bank, 2020, pp. 10-15. [Online]. Available: <https://publications.iadb.org/publications/english/document/How-Do-Households-Consume-Energy-Evidence-from-Latin-American-and-Caribbean-Countries.pdf>
- [4] K. Chooruang and K. Meekul, "Design of an IoT Energy Monitoring System," *2018 16th International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)*, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTKE.2018.8612412.
- [5] E. Aydin, D. Brounen, N. Kok, "Information provision and energy consumption: Evidence from a field experiment," *Energy Econ.*, vol. 71, pp. 403-410, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.eneco.2018.03.008.
- [6] J. D. C. Restrepo, T. Morales-Pinzón, T., "Effects of feedback information on the household consumption of water and electricity: a case study in Colombia," *J. Environ. Manage.*, vol. 262, p. 110315, May. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110315.
- [7] A. Nilsson, M. Wester, D. Lazarevic, N. Brandt, "Smart homes, home energy management systems and real-time feedback: Lessons for influencing household energy consumption from a Swedish field study," *Energy Build.*, vol. 179, pp. 15-25, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.08.026
- [8] V. Tiefenbeck, A. Wörner, S. Schöb, E. Fleisch, T. Staake, "Real-time feedback promotes energy conservation in the absence of volunteer selection bias and monetary incentives," *Nat. Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 35-41, Jan. 2019, doi: 10.1038/s41560-018-0282-1
- [9] R. Krishnamurthi, A. Kumar, D. Gopinathan, A. Nayyar, and B. Qureshi, "An Overview of IoT Sensor Data Processing, Fusion, and Analysis Techniques," *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 6076, Oct. 2020, doi: 10.3390/s20216076.
- [10] J. Leitão, P. Gil, B. Ribeiro and A. Cardoso, "A Survey on Home Energy Management," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 5699-5722, Jan. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2963502.
- [11] I. Dupont, R. Pereira, S. Juca and P. Carvalho, "Internet of Things Data Acquisition System Applied to Photovoltaic Water Pumping," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 10, pp. 2547-2560, Oct. 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8795134.
- [12] N. Ali Hussien, A. A. Daleh Al-Magsoosi, H. T. S. AlRikabi, and F. Theyab Abed, "Monitoring the Consumption of Electrical Energy Based on the Internet of Things Applications", *Int. J. Interact. Mob. Technol.*, vol. 15, no. 07, pp. pp. 17-29, Apr. 2021, doi: 10.3991/ijim.v15i07.20183.
- [13] S. Muralidhara, N. Hegde, P. M. Rekha, "An internet of things-based smart energy meter for monitoring device-level consumption of energy," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 87, p. 106772, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.compeleceng.2020.106772.
- [14] M. D. Mudaliar, N. Sivakumar, "IoT based real time energy monitoring system using Raspberry Pi," *Internet of Things*, vol. 12, p. 100292, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.iot.2020.100292.
- [15] M. Tastan, "Internet of things based smart energy management for smart home," *KSII Trans. Internet Inf. Syst.*, vol. 13, no. 6, pp. 2781-2798, Jun. 2019, doi: 10.3837/tiis.2019.06.001.
- [16] I. Machorro-Cano, G. Alor-Hernández, M. A. Paredes-Valverde, L. Rodríguez-Mazahua, J. L. Sánchez-Cervantes, and J. O. Olmedo-Aguirre, "HEMS-IoT: A Big Data and Machine Learning-Based Smart Home System for Energy Saving," *Energies*, vol. 13, no. 5, p. 1097, Mar. 2020, doi: 10.3390/en13051097.
- [17] H. N. Rafsanjani, A. Ghahramani, and A. H. Nabizadeh, "iSEA: IoT-based smartphone energy assistant for prompting energy-aware behaviors in commercial buildings," *Applied energy*, vol. 266, p. 114892, May 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114892.
- [18] AVAGO TECHNOLOGIES, "HCPL-7800A/HCPL-7800 Insulation Amplifier datasheet," 2008. [Online]. Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/678/V02-0410EN-908738.pdf>.
- [19] R. Wall, "A Report on the properties of the Yhdc Current Transformer and its suitability for use with the OpenEnergy monitor," Issue 6, Mar. 18, 2014. [Online]. Available: <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/files/YhdcCTReportIss6.pdf>
- [20] M. Asadpourahmadchali, M. Niasati, Y. Alinejad-Beromi, "Hybrid continuous circuit-trapezoidal integration method analysis of multi-cross structure of grounding system," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 292-302, May 2020, doi: 10.1049/iet-smt.2019.0050.

- [21] CFE Comisión Federal de Electricidad, "Esquema tarifario vigente-Hogar," 2022. [Online]. Available: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.aspx>



**Victor Manuel Sámano Ortega** received his B.S. degree in Mechatronics Engineering from the Technological Institute of Celaya, Guanajuato, Mexico, in 2017; M.S. degree in Mechanical Engineering from the Technological Institute of Celaya, Guanajuato, Mexico, in 2019. He is currently student in the PhD in Engineering Sciences, Technological

Institute of Celaya, his research interests include Intelligent Control, Direct Current Microgrids, and Energy Systems.



**Hugo Antonio Méndez Guzmán** received BSc degree in Electronic Engineering in 2007 and MSc degree in Electronic Engineering in 2012, both of them from the Ciudad Guzman Institute of Technology, Jalisco, Mexico. Nowadays, he is a fourth semester PhD student in the Celaya Institute of Technology. His research interests include Internet of Things, Smart

Farming, Image Processing and Artificial Intelligence.



**Juan José Martínez Nolasco** received his B.S. degree in Electronics Engineering from the Technological Institute of Guzman City, Jalisco, Mexico, in 2007; M.S. degree in Electronics Engineering from the Technological Institute of Celaya, Guanajuato, Mexico, in 2009; and a Ph.D. in Engineering Science from the Technological Institute of Celaya,

Guanajuato, Mexico, in 2018. He is currently teacher and researcher in the Department of Mechatronics Engineering, Technological Institute of Celaya, his research interests include intelligent control, direct current microgrids and applications of fuzzy logic control.



**José Alfredo Padilla Medina**, born in Iguala, Guerrero, México, April 21, 1969; Degree in electrical engineering, Technological Institute of Celaya, México, 1991; M.S. degree in electrical engineering, Guanajuato University, 1995; Doctorate degree in science (Optics), Centro de Investigaciones en Óptica, 2002.

He is currently teacher and researcher in the Department of Electronics Engineering, Technological Institute of Celaya, his research interests include Receiver Operating Characteristic (ROC) theory, Visual Perception, applications of Fuzzy Logic, Images Processing and thermal analysis. He has published more than 60 scientific papers.



**Mauro Santoyo Mora** born in Celaya, Guanajuato, Mexico in February 1st, 1989. He received the B.Eng. degree in Mechatronics Engineering and the M.Sc. in Electronics Engineering from the Celaya Institute of Technology (today Tecnológico Nacional de México en Celaya) at Celaya, Guanajuato, Mexico, in the years 2013 and 2016 respectively.

Actually, he is pursuing to achieve a PhD degree in Eng.Sc. at Tecnológico Nacional de México en Celaya.

Since 2013 he is integrated as Teacher in the Mechatronics Engineering Department at Tecnológico Nacional de México en Celaya, taking full-time participation in 2016. He also was Teacher for the Informatics and Communication Technologies Department at Tecnológico Nacional de México en Roque during years 2015 and 2016. He has published works related to robotics, virtual reality, and image processing. His research interests are virtual, augmented and mixed reality, image and signal processing, and robotics.



**Jose Guadalupe Zavala Villalpando** received the degree in mechanic engineering and the master's degree in mechanical science from the from the Instituto Tecnológico de Celaya, in 2004 and 2007, respectively. He is currently pursuing the Ph.D. degree in engineering sciences from Tecnológico Nacional de México en Celaya;

additionally, he is a teacher in the same institution in the Department of Mechatronics Engineering. His research interests include automation systems, robotic industrial, 3D printing, design of machine, and analysis of materials.