

UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



CINERGIA UG
Centro Internacional de Energía
Universidad de Guanajuato



CIENERGIA UG

Congreso Internacional de Energía UG

ME MO RIAS

2025

**Congreso Internacional de Energía de la
Universidad de Guanajuato - CIENERGIA UG 2025**

Octava Edición de las Memorias del
Congreso Internacional de Energía, CIENERGIA UG 2025.

10 - 12 de Septiembre de 2025





PRESIDENTE

DR. ALEJANDRO PIZANO MARTÍNEZ

Director del DIE de la UG

COORDINACIÓN GENERAL

DR. LUIS RAMÓN MERCHÁN VILLALBA

PTC del DIE de la UG

SECRETARIO GENERAL

DR. MIGUEL ÁNGEL GÓMEZ MARTÍNEZ

PTC del DIE de la UG

COORDINACIÓN EDITORIAL

DR. ARNOLDO ZAMORA CÁRDENAS

PTC del DIE de la UG

COORDINACIÓN TÉCNICA

DR. OSVALDO RODRÍGUEZ VILLALÓN

PTC del DIE de la UG

COORDINACIÓN DE LOGÍSTICA

DR. HÉCTOR ESTRADA GARCÍA

M.I. IRVING WILLIHADO REYES BUENFIL

M.I. ELENA DEL ROCÍO DÁVILA ÁLVAREZ

DIE de la UG

COORDINACIÓN DE DISEÑO Y DIFUSIÓN

DRA. XIOMARA GONZÁLEZ RAMÍREZ

M.E.D. J. DEL CARMEN MENDOZA

L.A.D. LESLI YARED VILLEGAS FONSECA

Departamento de Vinculación CINERGIA UG

COMITÉ ORGANIZADOR

COMITÉ TÉCNICO

DR. IVÁN ABEL HERNÁNDEZ ROBLES

PTC del DIE de la UG

DR. NÉSTOR DANIEL GALÁN HERNÁNDEZ

PTC de Ing. en Energía de la UPSIN

DR. ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA

PTC del DIE de la UG

DR. J. JUAN ROSALES GARCÍA

PTC del DIE de la UG

DR. JOSÉ MERCED LOZANO GARCÍA

PTC del DIE de la UG

DR. RAFAEL GUZMÁN CABRERA

PTC del DIE de la UG

DR. JESÚS MARTÍNEZ PATIÑO

PTC del DIE de la UG

DR. VÍCTOR JAVIER GUTIÉRREZ MARTÍNEZ

PTC del DIE de la UG



CIENERGIA UG

Congreso Internacional de Energía UG



INVITADOS DESTACADOS

El Congreso Internacional de Energía CIENERGIA UG 2025 contó con la participación de representantes de destacadas instituciones académicas e industriales, tanto nacionales como internacionales.



CIENERGIA UG

Congreso Internacional de Energía UG



EMPRESAS

Siemens Energy Wind Power Research & Development (SEWP R&D), Dinamarca.
Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), México.
Centro Nacional de Control de Energía (CENACE).
Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (LAPEM) – CFE.
Unión Nacional de Constructores Electromecánicos (UNCE).
Oropeza Ingenieros.

INSTITUCIONES

Universidad de Zaragoza, España.
Universidad de Guanajuato, México.
Universidad Autónoma del Estado de México.
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.
Universidad Panamericana.
Universidad Tecnológica de Manzanillo.
Universidad Tecnológica de Culiacán.
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).
Centro De Investigación En Alimentación Y Desarrollo, Unidad Mazatlán.
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ).
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI).
Tecnológico Nacional de México, Campus Celaya.
Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.
Instituto Tecnológico de Sonora.

PREFACIO

En la octava edición del Congreso Internacional de Energía de la Universidad de Guanajuato, CIENERGIA UG 2025, el Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) y el Comité Organizador invitaron a la comunidad científica, tecnológica e industrial, nacional e internacional, a participar en este encuentro académico con el propósito de fomentar el intercambio de conocimiento y el fortalecimiento del desarrollo en el ámbito energético. El congreso reafirma su compromiso con la formación, la investigación y la innovación tecnológica, ofreciendo un espacio donde convergen la academia, la industria y la sociedad para abordar los retos actuales y futuros del sector energético. Las actividades realizadas durante esta edición fueron las siguientes:

Conferencias Magistrales:

Impartidas por especialistas nacionales e internacionales, quienes compartieron perspectivas sobre el avance científico y tecnológico en la generación, almacenamiento y distribución de energía, así como sobre nuevas metodologías aplicadas a la ingeniería eléctrica y las energías renovables.

Presentación en sesión técnica:

Se llevaron a cabo 30 ponencias en modalidad híbrida, con la participación de investigadores, docentes, estudiantes y profesionales del sector. Los trabajos presentados abarcaron temas relacionados con eficiencia energética, energías limpias, automatización, control, y aplicaciones emergentes en la ingeniería eléctrica.

Exposición Industrial:

Participaron empresas del sector energético, presentando tecnologías, herramientas y soluciones enfocadas en la transmisión, distribución y protección de sistemas eléctricos, además de innovaciones orientadas al aprovechamiento de fuentes renovables.

Curso y Talleres Especializados:

Se ofreció un curso enfocado en la seguridad en instalaciones eléctricas de baja tensión, así como talleres prácticos relacionados con la preparación de cableado subterráneo, la protección contra descargas atmosféricas y las conexiones para sistemas de aterrizamiento eficientes.

El evento se desarrolló en modalidad híbrida, combinando actividades presenciales y virtuales, durante los días 10 al 12 de septiembre de 2025, contando con la participación de destacados ponentes y una comunidad académica comprometida con el desarrollo de un futuro energético más seguro, eficiente y sostenible.



CONTENIDO

- 09** **INTERMITENTE DEL CENTRO NACIONAL DE CONTROL DE ENERGÍA**
Camilo Narvaez Pérez
- 18** **CAMBIOS EN EL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN HOGARES: ANÁLISIS DE LAS CARGAS**
Jesús Martínez Patiño, José Merced Lozano García, Alejandro Pizano Martínez, Iván Abel Hernández Robles
- 22** **PLATAFORMA DE MONITOREO ENERGÉTICO CON IA Y NILM PARA REDUCCIÓN DE COSTOS EN PEQUEÑAS INDUSTRIAS**
Armando Jiménez - Zavala, Joel Salome - Baylon
- 30** **COMPARATIVA DEL SOMBREADO EN ARQUITECTURAS FOTOVOLTAICAS CON INVERSORES Y MICROINVERSORES USANDO SIMULINK**
Luis Ramon Merchan Villalba, Jorge Uriel Sevilla Romero, Daniel Peña Perez
- 35** **TRANSICIÓN HACIA LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN ELECTRODOMÉSTICOS: ANÁLISIS DE CONSUMO DE ENERGÍA EN REFRIGERADORES**
Jesús Martínez Patiño, José Merced Lozano García, Alejandro Pizano Martínez, Roberto Jose Muñoz Mujica



- 40** **SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL AGRÍCOLA CON IoT: ESP8266 Y RASPBERRY Pi 5**
Zyanya Yuritzi Parra Martínez, Igor Guryev, Salvador Pérez Martínez, Giovanni Hernández Gómez, Eduardo Cabal Yepez.
- 46** **SIMULACIÓN DEL PROCESO DE AUTOMATIZACIÓN DE PRESIÓN CON BALANZA DE PESOS MUERTOS**
Samuel Ortega Cano, José Juan Alfaro Rodriguez, José Miguel Sosa Zúñiga
- 52** **AJAKATL. SISTEMA ABIERTO DE BAJO COSTO PARA MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE BASADO EN IoT**
Edgar Ledezma Zavala, José Federico Velázquez Valdez, Laura Yaneth Sicaños Medina
- 58** **DETECCIÓN DE IMÁGENES DEEPFAKE CON REDES NEURONALES CONVOLUCIONES**
Jesus Antonio Cisneros Rivera, Misael Lopez Ramirez, Luis Manuel Ledezma Carrillo.
- 63** **LOCALIZACIÓN DE NODOS CON RSSI CARACTERIZADO EN UN ESCENARIO REAL**
Joaquín Mass Sánchez, Erica Ruiz Ibarra, Adolfo Espinoza Ruiz, Armando García Berumen y Adolfo Soto Cota
- 71** **APP DE VINCULACIÓN ENTRE ACADÉMICOS Y EMPRESARIOS DESARROLLADA EN "GOOGLE FLUTTER"**
Salvador Pérez Martínez, Giovanni Hernandez Gomez, Paula Concepción Isiordia



Intermitente del Centro Nacional de Control de Energía

CAMILO NARVAEZ PÉREZ^{1,2}

¹Centro Nacional de Control de Energía

²Universidad Abierta a Distancia de México

camilo.narvaez@cenace.gob.mx

camilo.np@nube.unadmexico.mx

RESUMEN El pronóstico de generación a corto plazo de las centrales eléctricas de generación intermitente (CEI) es un insumo básico que el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) debe realizar para que éste pueda ser utilizado en el proceso de la Asignación de Unidades de Generación por Confiabilidad (AU-GC), cuando se observe que el pronóstico realizado por el CENACE tiene una menor desviación que el pronóstico enviado por las mismas CEI. Para la elaboración de los pronósticos uno de sus principales insumos son los datos de generación, de las diferentes centrales eléctricas (CE), entre ellas las CEI: solares, eólicas, undimotrices, etcétera. En este tipo de tecnologías la radiación solar, las corrientes de viento, la amplitud de las olas y otras variables del tiempo se presentan de manera aleatoria sin que se les pueda controlar, y en consecuencia solo se deben aprovechar cuando éstas estén presentes. En esta investigación se presentarán algunas de las metodologías comunes que se utilizan para la elaboración del pronóstico de las CEI por parte de cada Gerencia de Control Regional (GCR) para el envío de las ofertas para la AU-GC en el CENACE.

PALABRAS CLAVE — Pronóstico, horas fuera de especificación, fenómeno meteorológico, ciclón tropical, huracán, tormenta tropical, tormenta invernal, lluvia torrencial, ondas de calor, centro de control de energía.

I. INTRODUCCIÓN

El pronóstico de generación a corto plazo de las centrales eléctricas (CE) de generación intermitente (CEI) es un insumo básico que el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) debe realizar para ser que este pueda ser utilizado en el proceso de la Asignación de Unidades de Generación por Confiabilidad (AU-GC), cuando se observe que el pronóstico realizado por el CENACE tiene una menor desviación que el pronóstico enviado por las CE intermitentes.

Uno de sus insumos principales, en la elaboración de los pronósticos de generación, son los datos de generación, de las CE, intermitentes, como lo son las solares, eólicas, undimotrices, piezoeléctricas, etcétera. Y dada su aleatoriedad, requieren especial atención en su elaboración.

Existen diversas metodologías para el pronóstico de la generación de estas tecnologías. Por ejemplo, de manera general, conociendo el valor esperado de la radiación solar se puede predecir la generación de las centrales fotovoltaicas, de forma similar al determinar la velocidad del viento esperada se puede pronosticar la generación de las centrales eólicas, y así para las demás tecnologías; y éstas se pueden integrar por cada Gerencia de Control Regional (GCR) para el envío de las ofertas para la AU-GC [1,2].

II. NORMATIVA APLICABLE EN EL CENACE

En el Manual de Pronósticos (MP) en el punto 3.1.1 [3], se señala que los Participantes del Mercado que representen Unidades de Central Eléctrica firmes no-despachables o intermitentes serán responsables de estimar los pronósticos de generación correspondientes a cada una de sus unidades y presentarlos como Ofertas de Venta o programas de generación, según corresponda, en el Mercado de Energía de Corto Plazo. De lo anterior se desprende que las GCR podrán solicitar a las CE su pronóstico de generación para cotejarlo contra los pronósticos realizados por la misma. Además de que les solicitará el envío de las horas y su afectación por mantenimiento del mes inmediato anterior y el mes en curso, para poder reflejar el porcentaje de afectación en los pronósticos a realizar.

Derivado de que en el punto 3.1.2 del MP se establece que, los Participantes del Mercado representantes de Unidades de Central Eléctrica serán responsables de proveer los insumos necesarios que permitan al CENACE emitir sus propios pronósticos de generación, mediante los formatos que el CENACE determine para ello, en consecuencia las GCR podrán solicitar el envío de las variables que les permitan elaborar los pronósticos de generación (por ejemplo, la medición de la energía en kWh, MWh, kVARh, MVARh, velocidad del viento [m/s], radiación solar [W/m²], temperatura [°C], presión barométrica (mBar), entre otras).

Para que el CENACE realice los pronósticos de generación de Centrales de Generación intermitente, se deben cumplir los siguientes criterios establecidos en la presente guía:

a) Las CE deberán no ser exentas. Dado que a éstas no se les obliga el envío de telemetría al CENACE.

b) Las CE deberán tener telemetría, de las variables eléctricas y meteorológicas asociadas a la tecnología, y enviarlas a la respectiva GCR.

c) Las CE deberán enviar con siete días de antelación las horas del porcentaje de afectación a su generación por mantenimiento del mes móvil inmediato anterior y el mes móvil en curso, mediante los formatos que el CENACE determine para ello y enviarlas a la respectiva GCR, para poder reflejar dicho porcentaje de afectación en los pronósticos a realizar.

d) Las CE deberán enviar con siete días de antelación a la fecha de inicio del período de prueba, los programas de generación durante dicho período, mediante los formatos que el CENACE determine para ello. En este período el CENACE no estará obligado a cumplir las métricas de error de los pronósticos establecidas por el mismo.

e) Si la capacidad de la CE es mayor ó igual al 2.5 % de la demanda horaria promedio del mes de mayor consumo en la GCR correspondiente, ó bien, todas aquellas que el CENACE determine, tomando en cuenta su impacto en la Operación Confiable del Sistema eléctrico nacional (SEN).

En el MP publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) se señala en 3.5.1 que las variables de entrada que serán consideradas en el modelo de pronóstico de corto plazo de generación intermitente son las descritas en el 3.4.1, las variables de entrada que serán consideradas en el modelo de pronóstico horario de generación intermitente son, de manera enunciativa y no limitativa, y si aplican de acuerdo al tipo de tecnología, las siguientes:

a) Información histórica de los últimos 3 meses de generación;

b) Ubicación física de las Unidades de Central Eléctrica;

c) Información sobre salidas y licencias para los siguientes 7 Días de Operación del Sistema de Administración de Salidas y del Sistema de Administración de Licencias del CENACE;

d) Pronósticos horarios de variables meteorológicas para los siguientes 7 Días de Operación en la ubicación física de las Unidades de Central Eléctrica. Las variables meteorológicas pueden ser, entre otras: i) Velocidad y dirección del viento; y, ii) Radiación solar.

e) Capacidad Instalada de las Unidades de Central Eléctrica;

f) Altura al centro del rotor;

g) Diámetro del rotor;

h) Inclinação y orientación de los módulos fotovoltaicos, o presencia de sistema seguimiento solar;

i) Capacidad instalada del inversor fotovoltaico;

j) Fecha de inicio de operación y fecha de decomisión;

k) Nodos asociados de conexión; y

l) Si la generación es para autoconsumo o alimenta a la red.

El CENACE podrá utilizar diferentes metodologías para el modelo de Pronóstico de Generación Intermitente, y en los párrafos siguientes se especifican algunas de las metodologías muy sencillas y útiles para la elaboración de dichos pronósticos.

III. METODOLOGÍAS PROPUESTAS [3]

A. MODELOS DE REGRESIONES

Se describen algunas de sus variantes en los párrafos siguientes [3,4].

1. Lineal (mínimos cuadrados). Los modelos o métodos de regresión lineal por mínimos cuadrados son una función matemática que intenta modelar probabilísticamente a una variable de estudio en relación a uno o más predictores de interés (variables independientes).

En el método de regresión hay una o varias variables independientes y una variable dependiente, donde se puede emplear el conocimiento de las variables independientes para pronosticar la variable dependiente.

En la regresión lineal, una línea recta es el modelo gráfico más sencillo para relacionar una variable dependiente con una o varias variables independientes. Este método consiste en encontrar la ecuación de la recta que mejor se ajuste al conjunto de puntos de datos XY, es decir, calcula la suma de las distancias al cuadrado entre los puntos reales y los puntos definidos por la recta estimada a partir de las variables introducidas en el modelo, de forma que la mejor estimación será la que minimice estas distancias. A esta línea se le conoce como la línea de regresión. La fórmula es la siguiente:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + \dots + B_mX_m + \varepsilon \quad (1)$$

donde:

Y = Variable dependiente.

$X_1, X_2, \dots, X_m$ = Variables Independientes.

$B_0, B_1, \dots, B_n$ = son los parámetros del modelo.

ε = Es una variable aleatoria de error.

m = Número de variables independientes.

El método empleado para determinar los valores de $B_0, B_1, \dots, B_n$ se conoce como método de mínimos cuadrados, mediante el cual se encuentra la mejor relación lineal entre las variables independientes y dependiente.

La ecuación de regresión múltiple, estimada con mínimos cuadrados, para dos variables independientes quedaría como:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} \quad (2)$$

La siguiente ecuación establece el criterio “minimizar la suma de cuadrados del error”:

$$\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 = 0 = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)(y_i - \hat{y}_i), \text{ entonces } \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i) = 0 \quad (3)$$

donde $b_0, b_1, \dots, b_n$ son los estimadores de $B_0, B_1, \dots, B_n$, m es la cantidad total de observaciones para cada variable, y_i es el valor de la variable dependiente para la i -ésima observación, $\hat{y}_i$ es el valor estimado para la i -ésima observación y x_{i1} es el valor de variable independiente 1 para la i -ésima observación.

Al utilizar el mismo ejemplo que se ha estado considerando, pero al agregar como variables independientes a la velocidad del viento ($X_{1,n+1,h}$) y a la radiación solar ($X_{2,n+1,h}$), se llegó a los valores $b_0 = -92.27$, $b_1 = 17.6318$, $b_2 = 5.6939$, y $b_3 = 0.8162$, utilizando un modelo como el ilustrado a continuación y con los datos de la [Tabla I](#).

$$\hat{Y}_{n+1,h} = \text{modelo generación eólica} + \text{modelo generación solar} \quad (4)$$

$$\hat{Y}_{n+1,h} = b_0 + b_1 X_{1,n+1,h} + b_2 + b_3 X_{2,n+1,h} \quad (5)$$

Al despreciar las constantes tanto del modelo eólico como del solar, dado que sin presencia de viento o de la radiación solar no es posible la generación (negativa en el caso de la generación eólica, $b_0 = -92.27$, y positiva en el caso de la generación solar, $b_2 = 5.6939$), se llega a:

$$\hat{Y}_{n+1,h} = 17.6318 X_{1,n+1,h} + 0.8162 X_{2,n+1,h}$$

En la [Tabla I](#), se muestra la serie de datos de generación horaria por tipo de tecnología eólica (MWh) y su velocidad promedio del viento (m/s) y de tecnología solar (MWh), con su respectiva radiación solar promedio (W/m^2).

TABLA I. DATOS DE GENERACIÓN POR TIPO DE TECNOLOGÍA INTERMITENTE (MWH).

Día	eg, energía generada (MWh) y vv, velocidad del viento (m/s)															
	n-7	n-6	n-5	n-4	n-3	n-2	n-1	n(hoy)	n+1							
Horario	eg	vv	eg	vv	eg	vv	eg	vv	eg	vv	eg	vv	eg	vv	eg	vv
00:00 - 01:00	484	26	152	14	101	13	182	8	319	16	378	15	9	3	39	11
01:00 - 02:00	411	24	128	21	112	14	205	12	264	16	279	16	6	5	40	11
02:00 - 03:00	311	18	153	18	115	16	222	12	227	13	266	15	8	6	49	11
03:00 - 04:00	205	11	145	17	77	17	224	12	241	18	219	11	11	8	46	13
04:00 - 05:00	154	9	154	15	69	16	196	8	197	19	149	9	8	7	42	9
05:00 - 06:00	136	9	156	13	58	12	190	14	157	16	120	9	5	8	36	6
06:00 - 07:00	125	11	160	12	43	11	212	12	139	12	130	9	2	7	39	3
07:00 - 08:00	112	12	123	14	30	12	222	11	167	9	62	9	1	4	37	3
08:00 - 09:00	87	14	108	14	23	14	261	9	229	12	30	11	1	4	25	6
09:00 - 10:00	51	12	86	15	15	13	258	10	224	12	29	12	0	5	10	7
10:00 - 11:00	26	11	237	21	23	16	257	11	238	15	17	12	0	7	10	9
11:00 - 12:00	27	13	379	24	27	16	212	12	257	19	30	15	0	8	7	9
12:00 - 13:00	28	14	432	28	45	15	179	15	257	19	60	13	3	8	8	5
13:00 - 14:00	30	12	451	34	101	17	131	16	261	19	59	12	10	11	29	3
14:00 - 15:00	39	13	452	28	149	20	147	18	255	20	65	14	21	12	39	9
15:00 - 16:00	57	15	438	27	129	17	146	16	268	17	68	14	18	12	49	8
16:00 - 17:00	62	18	447	23	109	17	162	15	306	19	25	13	13	9	71	10
17:00 - 18:00	70	19	444	24	61	14	219	14	340	19	20	11	20	9	105	12
18:00 - 19:00	89	19	369	22	18	12	247	14	403	20	11	11	30	9	110	11
19:00 - 20:00	83	17	301	14	20	11	276	15	409	19	8	10	53	11	66	9
20:00 - 21:00	108	17	285	14	27	12	307	14	323	16	9	9	73	12	54	6
21:00 - 22:00	113	15	198	13	78	9	329	15	342	16	11	9	78	11	52	4
22:00 - 23:00	109	13	145	12	118	6	376	17	401	17	11	7	71	14	57	5
23:00 - 24:00	146	14	86	14	153	6	325	18	373	18	12	5	48	10	28	5

eg, energía generada (MWh) y rs, radiación solar (W/m^2)																
00:00 - 01:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00 - 02:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00 - 03:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00 - 04:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00 - 05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00 - 06:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00 - 07:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00 - 08:00	10	16	10	18	6	15	3	8	4	7	7	16	4	9	5	11
08:00 - 09:00	190	174	230	200	162	184	153	145	152	130	118	161	81	88	140	159
09:00 - 10:00	368	341	422	352	429	414	343	334	322	221	161	222	339	262	238	326
10:00 - 11:00	465	560	495	572	478	598	356	384	355	324	249	294	421	449	322	459
11:00 - 12:00	494	683	448	614	495	663	309	407	401	407	378	425	448	557	387	505
12:00 - 13:00	492	687	378	564	490	641	408	553	414	430	291	357	398	553	396	528
13:00 - 14:00	488	686	307	464	403	475	459	587	417	434	321	397	314	460	372	569
14:00 - 15:00	491	657	198	237	301	324	379	385	404	422	361	432	296	384	208	239
15:00 - 16:00	492	586	176	178	385	519	431	500	460	537	247	274	139	150	163	196
16:00 - 17:00	441	440	91	201	319	312	335	359	413	434	113	158	118	100	65	113
17:00 - 18:00	160	192	62	60	117	125	94	131	146	196	34	45	60	50	49	62
18:00 - 19:00	3	4	1	4	1	4	1	5	1	7	0	4	2	5	0	3
19:00 - 20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00 - 21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00 - 22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00 - 23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00 - 24:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Estos datos son para una GCR, suponiendo una de capacidad total de 1196 MW. Los resultados de los pronósticos de velocidad del viento, su respectiva generación, radiación solar y su generación correspondiente, así como la generación total y sus métricas de error del BIAS (sesgo) y MAE (error absoluto promedio) de esta metodología se observan en la [Tabla II](#).

Las fórmulas para el cálculo de las métricas de error del pronóstico BIAS y MAE son enunciadas a continuación:

$$BIAS = \frac{100}{24(n)Capacidad} \sum_{d=1}^n \sum_{h=1}^{24} (gen_{real} - gen_{pron}) \quad (6)$$

$$MAE = \frac{100}{24(n)Capacidad} \sum_{d=1}^n \sum_{h=1}^{24} |gen_{real} - gen_{pron}| \quad (7)$$

Cabe señalar que la variable de capacidad, citada en las dos ecuaciones anteriores puede acotarse a los casos siguientes:

- La generación intermitente total en la GCR (en cuyo caso la capacidad será la suma de la capacidad de las plantas intermitentes consideradas en la GCR, la generación real será la suma de toda la generación real de todas las plantas intermitentes consideradas en la GCR y la generación pronosticada será la suma de la generación intermitente pronosticada de todas las plantas intermitentes consideradas en la GCR).

TABLA II. RESULTADOS DEL PRONÓSTICO POR EL MÉTODO DE PROMEDIOS.

Horario	tecnología eólica		tecnología solar		generación total		errores	
	vv	eg	rs	eg	n+1 (real)	n+1 (pronóstico)	e	e
00:00 - 01:00	0	0	1	0	53	0	53	53
01:00 - 02:00	0	0	0	0	28	0	28	28
02:00 - 03:00	2	27	0	0	29	27	1	1
03:00 - 04:00	9	166	0	0	19	166	-146	146
04:00 - 05:00	7	123	0	0	17	123	-106	106
05:00 - 06:00	6	98	0	0	18	98	-81	81
06:00 - 07:00	2	34	0	0	12	34	-23	23
07:00 - 08:00	0	0	17	14	7	14	-7	7
08:00 - 09:00	0	0	140	114	189	114	75	75
09:00 - 10:00	0	0	282	230	345	230	115	115
10:00 - 11:00	2	29	512	418	437	447	-10	10
11:00 - 12:00	1	18	632	516	463	533	-70	70
12:00 - 13:00	5	93	615	502	476	595	-119	119
13:00 - 14:00	11	191	474	387	508	577	-69	69
14:00 - 15:00	11	196	412	337	452	533	-81	81
15:00 - 16:00	12	204	80	66	340	269	71	71
16:00 - 17:00	7	120	29	23	236	143	92	92
17:00 - 18:00	8	138	2	2	213	140	73	73
18:00 - 19:00	9	166	3	3	207	168	38	38
19:00 - 20:00	14	250	0	0	184	250	-66	66
20:00 - 21:00	17	295	0	0	218	295	-77	77
21:00 - 22:00	16	283	0	0	372	283	89	89
22:00 - 23:00	25	437	0	0	429	437	-8	8
23:00 - 24:00	18	315	0	0	408	315	93	93
							-0.47	5.54
							BIAS	MAE

- La generación total por tipo de tecnología intermitente: solar, eólica, etcétera (en cuyo caso la capacidad será la suma de la capacidad de las plantas del tipo de tecnología intermitente consideradas en la GCR, la generación real será la suma de toda la generación real de todas las plantas intermitentes del mismo tipo de tecnología consideradas en la GCR y la generación pronosticada de todas las plantas intermitentes del mismo tipo de tecnología consideradas en la GCR).
- La generación por planta (granja ó parque, en cuyo caso la capacidad en este caso hará mención a la capacidad de la planta, la generación real hará mención a la generación de la planta y la generación pronosticada hará mención a la generación pronosticada de la planta).

Además, en la [Tabla II](#) se realizó una evaluación por día ($d = n = 1, h = 1, 2, 3, \dots, 24$), pero pueden fijarse períodos de evaluación distintos: a) diario, b) semanal, c) mensual y d) etcétera.

La elección del tipo de capacidad y período a evaluar dependerá de la necesidad y aspecto a resaltar que cada GCR defina ó requiera.

Es de recalcar que estos modelos dependen en gran medida de la calidad de:

- las mediciones de la velocidad del viento y de la radiación solar, como variables independientes, de la energía horaria por tecnología, como variables dependientes (ya que son los insumos para la obtención de los modelos a utilizar),
- los pronósticos de la velocidad del viento y de la radiación solar, como variables independientes (pues éstas alimentan al modelo desarrollado),
- los modelos a obtener (dado que con cada modelo se obtendrá un determinado resultado),

- la cantidad de datos a utilizar en la obtención de los modelos [en el caso anterior, para los modelos meteorológicos, fueron 56 datos horarios por cada variable, velocidad del viento y radiación solar, y 168 datos horarios de tanto para las variables independientes (variables meteorológicas) y como para las dependientes (energía generada)].

Utilizando los datos de la [Tabla II](#) se ilustran a continuación los resultados de manera gráfica de cada tipo de tecnología:

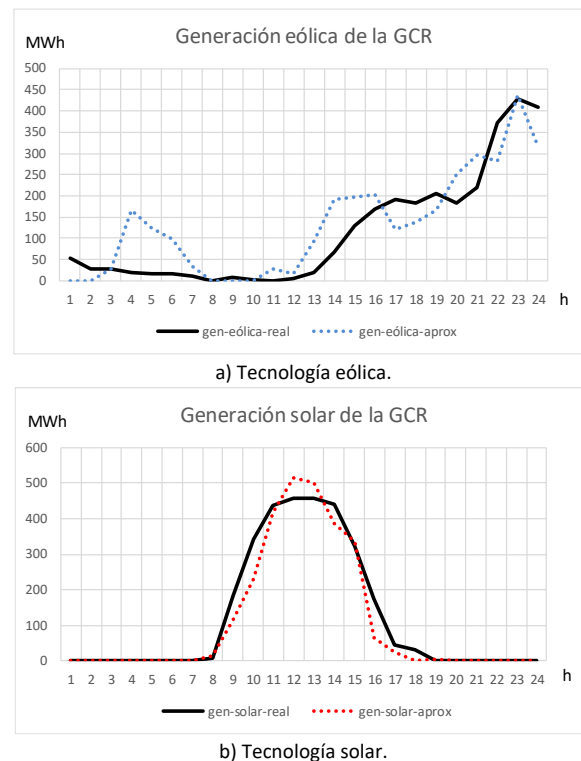


Fig. 1. Resultados del pronóstico de generación de energía intermitente utilizando el método de regresión lineal.

- Lineal múltiple (mínimos cuadrados). Cabe señalar que se pueden utilizar modelos de regresión lineal múltiple, es decir, diferentes al citado en el inciso anterior, ya que dicho modelo es ejemplificativo. Ya sea utilizando más variables (temperatura en los paneles solares, humedad relativa en las turbinas eólicas, por ejemplo) u otras variables (algunas ficticias, como la velocidad de corte en el caso de las tecnologías eólicas, la afectación en la cantidad de generación por causa del mantenimiento en un tiempo determinado, por ejemplo).

B. MODELOS DE PROMEDIOS

1. Promedio móvil simple.

En el caso de las horas coincidentes de dos ó más días anteriores, dado que el pronóstico de promedio móvil simple es una buena opción para patrones de demanda aleatoria o nivelada donde se pretende eliminar el impacto de los

elementos irregulares históricos mediante un enfoque de periodos de hasta 7 días anteriores. El método se utiliza cuando se quiere dar más importancia a un conjunto de datos más recientes para obtener la previsión. Cada punto de una media móvil de una serie temporal es la media aritmética de un número de puntos consecutivos de la serie, donde el número de puntos es elegido de tal manera que los efectos estacionales o irregulares sean eliminados.

Por ejemplo, en la [Tabla III](#), se muestra la serie de datos de generación horaria (en MWh, para una GCR, suponiendo una de capacidad total de 1196 MW).

$$\text{Fórmula: } \hat{X}_{n+1,h} = \frac{\sum_{t=1}^k X_{n-t,h}}{k} \quad (8)$$

donde:

$\hat{X}_{n+1,h}$ = Promedio de generación de energía en el día $n+1$ de la hora h

$X_{n-t,h}$ = Generación real de los días anteriores a n de la hora h

k = Número de días

Aún cuando se conoce el valor de la generación real del día en Adelanto ($n+1$), visto en la sección de Modelos de regresiones, se pronosticarán sus veinticuatro horas demandas, suponiendo que se utiliza la generación de los siete días anteriores:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{n+1,1} &= \frac{\sum_{t=1}^7 X_{n-t,1}}{7} = \frac{484 + 152 + 101 + 182 + 319 + 378 + 9}{7} = 232 \\ \hat{X}_{n+1,2} &= \frac{\sum_{t=1}^7 X_{n-t,2}}{7} = \frac{411 + 128 + 112 + 205 + 264 + 279 + 6}{7} = 201 \\ &\vdots \\ \hat{X}_{n+1,24} &= \frac{\sum_{t=1}^7 X_{n-t,24}}{7} = \frac{146 + 86 + 153 + 325 + 373 + 12 + 48}{7} = 163 \end{aligned}$$

El total de resultados de esta metodología se muestra en la [Tabla IV](#), y también se muestran las métricas de error del BIAS y MAE (en este caso de sólo veinticuatro horas, de forma ilustrativa, ya que el Manual de Pronósticos especifica que el MAE y BIAS se calculen de manera mensual).

TABLA III. DATOS DE GENERACIÓN DE TECNOLOGÍA INTERMITENTE (MWH).

Horario	n-7	n-6	n-5	n-4	n-3	n-2	n-1	n (hoy)	n+1
00:00 - 01:00	484	152	101	182	319	378	9	39	53
01:00 - 02:00	411	128	112	205	264	279	6	40	28
02:00 - 03:00	311	153	115	222	227	266	8	49	29
03:00 - 04:00	205	145	77	224	241	219	11	46	19
04:00 - 05:00	154	154	69	196	197	149	8	42	17
05:00 - 06:00	136	156	58	190	157	120	5	36	18
06:00 - 07:00	125	160	43	212	139	130	2	39	12
07:00 - 08:00	123	133	36	226	172	69	5	42	7
08:00 - 09:00	277	338	185	414	380	148	82	165	189
09:00 - 10:00	419	508	444	601	546	190	339	249	345
10:00 - 11:00	491	731	501	613	593	265	421	332	437
11:00 - 12:00	521	826	522	521	658	408	449	394	463
12:00 - 13:00	519	810	535	587	671	350	401	404	476
13:00 - 14:00	518	758	504	590	677	380	324	401	508
14:00 - 15:00	530	651	450	526	659	426	317	247	452
15:00 - 16:00	548	614	513	577	728	315	158	212	340
16:00 - 17:00	504	538	428	497	718	138	130	136	236
17:00 - 18:00	230	506	178	313	486	53	80	155	213
18:00 - 19:00	91	370	19	248	404	11	31	110	207
19:00 - 20:00	83	301	20	276	409	8	53	66	184
20:00 - 21:00	108	285	27	307	323	9	73	54	218
21:00 - 22:00	113	198	78	329	342	11	78	52	372
22:00 - 23:00	109	145	118	376	401	11	71	57	429
23:00 - 24:00	146	86	153	325	373	12	48	28	408

TABLA IV. RESULTADOS DEL PRONÓSTICO POR EL MÉTODO DE PROMEDIOS.

Horario	n+1 (real)	n+1 (pronóstico)	e	e
00:00 - 01:00	53	232	-179	179
01:00 - 02:00	28	201	-172	172
02:00 - 03:00	29	186	-157	157
03:00 - 04:00	19	160	-141	141
04:00 - 05:00	17	132	-115	115
05:00 - 06:00	18	118	-100	100
06:00 - 07:00	12	116	-104	104
07:00 - 08:00	7	109	-102	102
08:00 - 09:00	189	261	-72	72
09:00 - 10:00	345	435	-90	90
10:00 - 11:00	437	517	-80	80
11:00 - 12:00	463	558	-95	95
12:00 - 13:00	476	554	-78	78
13:00 - 14:00	508	536	-28	28
14:00 - 15:00	452	508	-57	57
15:00 - 16:00	340	494	-154	154
16:00 - 17:00	236	422	-186	186
17:00 - 18:00	213	264	-51	51
18:00 - 19:00	207	168	39	39
19:00 - 20:00	184	164	19	19
20:00 - 21:00	218	162	57	57
21:00 - 22:00	372	164	208	208
22:00 - 23:00	429	176	254	254
23:00 - 24:00	408	163	245	245
			-3.96	9.69
			BIAS	MAE

2. Promedios móviles ponderados.

Este método es una variación del utilizado en el de promedio móvil. Mientras que en el promedio móvil ponderado se asigna cierta importancia (peso o ponderación) a cualquier dato del promedio (siempre que la sumatoria de las ponderaciones sean equivalentes al 100 % de éstas, ó algún equivalente, en tanto que en el promedio móvil simple se le asigna igual importancia a cada uno de los datos que componen dicho promedio). Es una práctica regular aplicar el factor de ponderación (porcentaje) mayor al dato más reciente.

$$\text{Fórmula: } \hat{X}_{n+1,h} = \sum_{t=1}^k C_t * X_{n-t,h} \quad (9)$$

donde:

$\hat{X}_{n+1,h}$ = Promedio de generación de energía, día $n+1$ de la hora h

$X_{n-t,h}$

= Generación real de los días anteriores a n de la hora h

C_t = Factor de ponderación del día $n - t$

k = Número de días

Retomando los datos del ejemplo utilizado en promedio móvil simple, y considerando una ponderación de 50, 20, 10, 5, 5, 5 y 5 % para los días $n-1$, $n-2$, ..., respectivamente, nuevamente se pronosticarán las horas $X_{n+1,1}$, $X_{n+1,2}$ y $X_{n+1,24}$, a modo de ejemplo, con los siete valores previos al día n (actual) para obtener el día de interés $n+1$ (mañana):

$$\begin{aligned}\hat{X}_{n+1,1} &= \sum_{t=1}^7 C_t * X_{n-t,1} = 47 \\ \hat{X}_{n+1,2} &= \sum_{t=1}^7 C_t * X_{n-t,2} = 40 \\ &\vdots \\ \hat{X}_{n+1,24} &= \sum_{t=1}^7 C_t * X_{n-t,24} = 20\end{aligned}$$

Los Factores de Ponderación, son determinados por cada Gerencia de Control Regional, de acuerdo a un análisis estadístico en particular. Los resultados, sus métricas de error del BIAS y MAE de esta metodología se observan en la [Tabla V](#).

Es de notarse que la calidad de estos modelos depende básicamente de:

- la cantidad de datos a utilizar en la obtención de los modelos (en ambos incisos anteriores se utilizaron 7 datos por cada hora a pronosticar),
- la ponderación a elegir por cada una de las componentes (en el segundo inciso, el b, se consideró que entre más “lejano” el día a utilizar con respecto al día a pronosticar, más baja su ponderación),
- la calidad de los datos a utilizar en la obtención de los modelos (energía generada, MWh, en ambos incisos anteriores).

TABLA V. RESULTADOS DEL PRONÓSTICO POR EL MÉTODO DE PROMEDIOS PONDERADOS.

Horario	n+1 (real)	n+1 (pronóstico)	e	e
00:00 - 01:00	53	47	7	7
01:00 - 02:00	28	40	-12	12
02:00 - 03:00	29	33	-5	5
03:00 - 04:00	19	25	-6	6
04:00 - 05:00	17	20	-3	3
05:00 - 06:00	18	18	-1	1
06:00 - 07:00	12	18	-6	6
07:00 - 08:00	7	16	-9	9
08:00 - 09:00	189	39	150	150
09:00 - 10:00	345	63	282	282
10:00 - 11:00	437	77	360	360
11:00 - 12:00	463	83	380	380
12:00 - 13:00	476	82	394	394
13:00 - 14:00	508	80	428	428
14:00 - 15:00	452	77	375	375
15:00 - 16:00	340	77	263	263
16:00 - 17:00	236	68	168	168
17:00 - 18:00	213	40	173	173
18:00 - 19:00	207	22	184	184
19:00 - 20:00	184	20	164	164
20:00 - 21:00	218	21	197	197
21:00 - 22:00	372	20	352	352
22:00 - 23:00	429	20	410	410
23:00 - 24:00	408	20	388	388
			16.14	16.43
			BIAS	MAE

C. MODELOS DE DÍAS SIMILARES.

Los modelos de días similares utilizan factores para encontrar patrones similares al día que se pretenda pronosticar, tomando en cuenta el siguiente principio [3,4,5]:

“El comportamiento de la generación de energía eléctrica entre dos días con factores de impacto (variables de entrada) similares, tales como condiciones meteorológicas (velocidad del viento, radiación solar, temperatura, humedad relativa, precipitación pluvial, etcétera), la hora del día (1, 2, ..., 24), y la cantidad de energía producida (MWh), son relativamente similares entre sí”.

Tomando en cuenta las variables meteorológicas, de energía generada y hora del día, este método calcula un coeficiente de similitud entre el día a pronosticar y algunos días en el pasado; se asignan factores a cada variable, y en función de estas se buscan los días con mayor similitud al día a pronosticar y los días previos seleccionados por la persona pronosticadora. Una vez que se determinan cuáles son los días más similares, se aplica un factor de ajuste de acuerdo al comportamiento presentado en las últimas horas del día de referencia (por ejemplo, el día de hoy) respecto a la generación dada de cada día encontrado. Para el cálculo del pronóstico final se promedian los pronósticos en función de los s días más similares.

En el caso de los datos analizados en los ejemplos anteriores se tiene que la generación tiene un comportamiento que en buena medida depende de la generación solar, sin embargo, es importante señalar que la velocidad del viento al ser la componente más errática se le considerará en gran medida por la variabilidad que le proporciona a la generación total de dicha GCR en las horas que no se tiene radiación solar (primeras ocho horas y últimas cinco horas del día, para la época del año en cuestión); esto se observa en el [Fig. 2](#). De manera que se buscará, en este caso, que el día que tenga menor variabilidad en lo relacionado a la velocidad del viento, acorde a un promedio de las primeras doce horas del día en curso con respecto a las primeras doce horas de cada uno de los días anteriores; que para este caso fue el día $n - 3$ (dándose una diferencia de los promedios de 0.1 m/s). Cabe señalar que cada una de las primeras doce horas se consideraron como:

$$\hat{Y}_{n+1,h} = 0.9\hat{Y}_{día_actual,h} + 0.1\hat{Y}_{día_más_similar,h} \quad (10)$$

En tanto, que el resto de cada una de las doce horas del día a pronosticar se calcularon de la manera siguiente:

$$\hat{Y}_{n+1,h} = \hat{Y}_{día_más_similar,h} + \left[\frac{1}{12} \sum_{h=1}^{12} \hat{Y}_{día_mas_similar,h} - \frac{1}{12} \sum_{h=1}^{12} \hat{Y}_{día_actual,h} \right] \quad (11)$$

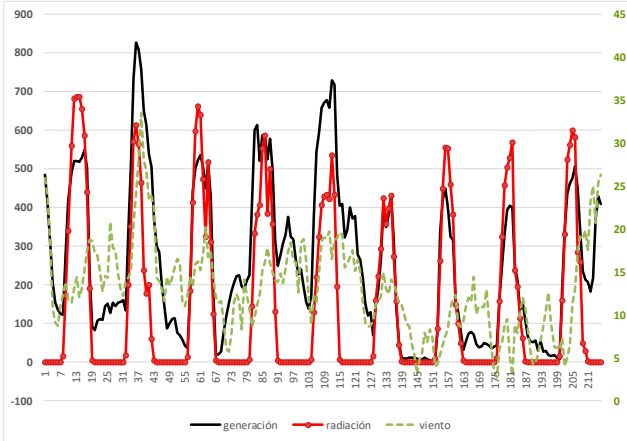


Fig. 2. Componentes de la generación intermitente (solar y eólica).

Es importante recalcar que se pueden hacer consideraciones distintas a las anteriormente señaladas, ya que éstas son solo un ejemplo. Los resultados del pronóstico generación total de la GCR y sus métricas de error del BIAS y MAE de esta metodología se observan en la [Tabla VI](#).

Para esta metodología, la calidad de los resultados depende de manera general de:

- la(s) variable(s) independiente(s) seleccionadas y para el patrón seleccionado,
- la repetición de los patrones en el período de los días analizados, con respecto a la(s) variable(s) independiente(s) seleccionadas y al patrón elegido,
- la cantidad de datos a utilizar en la obtención de los modelos (para este modelo se utilizaron siete días con sus veinticuatro horas),

TABLA VI. RESULTADOS DEL PRONÓSTICO POR EL MÉTODO DE DÍAS SIMILARES.

Horario	n+1 (real)	n+1 (pronóstico)	e	e
00:00 - 01:00	53	67	-13	13
01:00 - 02:00	28	62	-34	34
02:00 - 03:00	29	67	-38	38
03:00 - 04:00	19	66	-46	46
04:00 - 05:00	17	58	-41	41
05:00 - 06:00	18	48	-31	31
06:00 - 07:00	12	49	-38	38
07:00 - 08:00	7	55	-47	47
08:00 - 09:00	189	187	2	2
09:00 - 10:00	345	279	67	67
10:00 - 11:00	437	358	79	79
11:00 - 12:00	463	421	42	42
12:00 - 13:00	476	469	7	7
13:00 - 14:00	508	476	32	32
14:00 - 15:00	452	458	-6	6
15:00 - 16:00	340	527	-187	187
16:00 - 17:00	236	517	-281	281
17:00 - 18:00	213	285	-72	72
18:00 - 19:00	207	203	4	4
19:00 - 20:00	184	208	-24	24
20:00 - 21:00	218	122	97	97
21:00 - 22:00	372	140	232	232
22:00 - 23:00	429	199	230	230
23:00 - 24:00	408	171	237	237
			0.59	6.57
			BIAS	MAE

- la calidad de los datos a utilizar en la obtención de los modelos (energía generada, MWh, velocidad del viento y la radiación solar).

D. MODELOS POLINOMIALES

Existen una gran variedad de métodos de este tipo, entre los que caben destacar, los polinomios de Padé, Chebyshev, Newton, Legendre, etcétera.

- Polinomios de Padé. Este modelo es del tipo de polinomios racionales. La aproximación racional de una función Y sobre una pequeña porción de su dominio $[a,b]$, es el cociente de dos polinomios $N(X)$ y $D(X)$ de grados p y q , respectivamente. Y se denota por:

$$Y_{n+1,h} \approx \hat{Y}_{n+1,h} = \frac{N_{n+1,h}}{D_{n+1,h}} = \frac{a_0 + a_1 X_{n+1,h} + \dots + a_p X_{n+1,h}^p}{b_0 + b_1 X_{n+1,h} + \dots + b_q X_{n+1,h}^q} \quad (12)$$

De hecho, cuando $p = 0$ y $q = r$, la aproximación de Padé es simplemente el r -ésimo polinomio de Maclaurin. El objetivo principal de la aproximación es hacer lo más pequeño posible el error máximo entre la función original Y y la función aproximada, $\hat{Y}_{n+1,h}$. Además, q debe ser mayor o igual a p , esto con el fin de que la fracción sea propia. El polinomio es de orden r , siendo $r = p + q$. Los polinomios del numerador y denominador son:

$$N_{n+1,h} = a_0 + a_1 X_{n+1,h} + \dots + a_p X_{n+1,h}^p \quad (13)$$

$$D_{n+1,h} = b_0 + b_1 X_{n+1,h} + \dots + b_q X_{n+1,h}^q \quad (14)$$

Proponiendo que $b_0 \neq 0$. Y en el caso de que se normalice el numerador y denominador con respecto a b_0 , la aproximación toma la forma siguiente:

$$\hat{Y}_{n+1,h} = \frac{c_0 + c_1 X_{n+1,h} + \dots + c_p X_{n+1,h}^p}{1 + d_1 X_{n+1,h} + \dots + d_q X_{n+1,h}^q} \quad (15)$$

donde $c_i = a_i/b_0$ y $d_j = b_j/b_0$. En consecuencia, se tienen $r+1$ constantes a determinar. Despejando del lado derecho de la ecuación anterior al numerador del cociente se llega a:

$$(1 + d_1 X_{n+1,h} + \dots + d_q X_{n+1,h}^q) \hat{Y}_{n+1,h} = c_0 + c_1 X_{n+1,h} + \dots + c_p X_{n+1,h}^p \quad (16)$$

o bien,

$$\hat{Y}_{n+1,h} = c_0 + c_1 X_{n+1,h} + \dots + c_p X_{n+1,h}^p - d_1 X_{n+1,h} \hat{Y}_{n+1,h} - \dots - d_q X_{n+1,h}^q \hat{Y}_{n+1,h} \quad (17)$$

Si la variable X toma un valor en particular, se tendrá una ecuación lineal con $r+1$ incógnitas: $d_1, d_2, \dots, d_n, c_0, c_1, \dots, c_m$. Es sencillo observar que, para encontrar el valor de las constantes, únicamente se requiere de evaluar a la expresión anterior en $r + 1$ horas (del período de días de interés); es

decir, para $r + 1$ valores de X ; obteniéndose el sistema de ecuaciones lineales simultáneas:

$$\begin{bmatrix} 1 & X_{n-1} & \dots & X_{n-1}^p & -Y_{n-1,h}X_{n-1} & \dots & -Y_{n-1,h}X_{n-1}^q \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{n-s} & \dots & X_{n-s}^p & -Y_{n-s,h}X_{n-s} & \dots & -Y_{n-s,h}X_{n-s}^q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ c_1 \\ \vdots \\ c_p \\ d_1 \\ \vdots \\ d_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{n-1,24} \\ Y_{n-1,23} \\ \vdots \\ Y_{n-u,24} \\ Y_{n-u,23} \\ \vdots \\ Y_{n-s,h} \end{bmatrix} \quad (18)$$

es de notarse que los subíndices $n - s$ y h en conjunto deben dar como resultado las $r + 1$ evaluaciones necesarias de historia de la generación para obtener las incógnitas. Así, el sistema anterior es de la forma, $Bz = Y$; si $p = q$, y su solución estará dada mediante:

$$z = B^{-1}Y \quad (19)$$

pero, si m es diferente a n se tiene un sistema sobredimensionado el cual se resuelve por:

$$z = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (20)$$

Para ejemplificar el método polinomial de Padé, se elige un orden de $r = 10$, con $p = q = 5$, según se observa en la siguiente ecuación:

$$\hat{Y}_{n+1,h} = \frac{0.63 + 49.12X_{n+1,h} - 114.5X_{n+1,h}^2 + 86.34X_{n+1,h}^3 - 24.55X_{n+1,h}^5 + 2.02X_{n+1,h}^5}{1 - 2.7X_{n+1,h} + 2.68X_{n+1,h}^2 - 1.25X_{n+1,h}^3 + 0.28X_{n+1,h}^5 - 0.02X_{n+1,h}^5}$$

los coeficientes de este polinomio se obtienen, utilizando los datos de la [Tabla II](#), se visualizan en la ecuación anterior (considerando que x es $= (x_1 + x_2)/1000$, siendo x_1 la velocidad del viento en cm/s y x_2 la radiación solar en W/m²), además de un factor de escalamiento, y sus resultados y métricas de error del BIAS y MAE se ilustran en la [Tabla VII](#).

TABLA VII. RESULTADOS DEL PRONÓSTICO POR EL MÉTODO DE POLINOMIAL DE PADÉ.

Horario	n+1 (real)	n+1 (pronóstico)	e	e
00:00 - 01:00	53	109	-56	56
01:00 - 02:00	28	130	-102	102
02:00 - 03:00	29	156	-127	127
03:00 - 04:00	19	186	-167	167
04:00 - 05:00	17	134	-117	117
05:00 - 06:00	18	97	-79	79
06:00 - 07:00	12	97	-86	86
07:00 - 08:00	7	95	-88	88
08:00 - 09:00	189	134	55	55
09:00 - 10:00	345	112	233	233
10:00 - 11:00	437	152	285	285
11:00 - 12:00	463	178	285	285
12:00 - 13:00	476	254	222	222
13:00 - 14:00	508	277	231	231
14:00 - 15:00	452	297	154	154
15:00 - 16:00	340	321	19	19
16:00 - 17:00	236	284	-49	49
17:00 - 18:00	213	297	-84	84
18:00 - 19:00	207	258	-51	51
19:00 - 20:00	184	345	-161	161
20:00 - 21:00	218	374	-155	155
21:00 - 22:00	372	305	67	67
22:00 - 23:00	429	381	48	48
23:00 - 24:00	408	396	12	12
			1.01	10.22
			BIAS	MAE

Es importante recalcar que la calidad de estos modelos depende principalmente de:

- la cantidad de datos a utilizar en la obtención de los modelos (para este modelo se utilizaron siete días con sus veinticuatro horas),
- la elección del orden de la aproximación ($r = 10$, en el ejemplo anterior) y grado de los polinomios del numerador y del denominador ($p = q = 5$, para el caso expresado anteriormente),
- la calidad de los datos a utilizar en la obtención de los modelos (energía generada, MWh, en ambos incisos anteriores).

Nota: debe recordarse que, a mayor grado de un polinomio, mayor será su inestabilidad.

Como ya se mencionó, existen diversos métodos de ajuste o aproximación de curvas, los antes ejemplificados son algunos de éstos. Pero también se tienen los modelos polinomiales por interpolación entre los cuales se tienen principalmente los siguientes tipos: polinomios de Lagrange, Newton, Neville, Hermite, entre otros. Modelos estadísticos, algunos de los más utilizados son el ARMA, promedio móvil auto regresivo (autoregressive moving average), que son efectivos en datos que se presentan en series de tiempo estacionarios. Y para datos de sistemas no estacionarios se utilizan métodos como el ARIMA (autoregressive integrated moving average), el Box & Jenkins, y variaciones de los mismos: AR, MA, ARIMAX (ARIMA utilizando una ó más variables hexógenas), SARIMA (ARIMA utilizando una ó más variables estacionales), etcétera. Modelos estocásticos, que basan su metodología en probabilidades como es el caso de las cadenas de Markov, los de *caminata aleatoria* (Movimiento browniano, o proceso de Wiener-Lévy), método Montecarlo, modelos de Poisson, entre otros. Modelos de redes neuronales del tipo de reconocimiento de patrones. Se utilizan para sistemas no lineales ó donde los métodos de regresión o estadísticos dan resultados imprecisos, ya que estos sistemas tienen la cualidad de “aprender”; esta es una de las razones por la cual se utiliza un tipo de red neuronal artificial (RNA) en sistemas con *gran variabilidad*.

Es de suma importancia señalar, que hasta ahora se han señalado únicamente algunos de los muy diversos tipos de métodos, y el pronosticador en turno deberá seleccionar el que reduzca más les métricas de error, BIAS y MAE; ó bien, hacer una combinación de éstos, ó utilizar algún otro(s) método(s) no ilustrado(s) en esta investigación [5,6,7]. Dicha selección es en función de su experiencia, ya que, aún cuando los resultados puedan ser “mejores” para ciertos días, no necesariamente lo serán para otros días; por ello, el pronosticador deberá tomar la decisión de elegir la metodología ó combinación de ellas que ayude a dar “buenos” resultados para los períodos de tiempo que requiera

el parque solar, eólico, la GCR o zona a pronosticar su generación.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha descrito la importancia de los pronósticos de generación intermitente de corto plazo en los centros de control de energía, utilizados en los SEP, resaltando el impacto que tienen diversas variables meteorológicas, radiación solar y velocidad del viento en su generación eléctrica. Posteriormente, describieron y ejemplificaron diversas metodologías de pronóstico, obteniendo resultados y métricas de error, que permitan al lector observar sus características, para la elección de alguna de las mismas. Finalmente, se mencionan diversos métodos y técnicas no utilizadas pero utilizables en este tipo de pronósticos de generación [3,4,5,6,7].

En una segunda etapa de esta investigación, se estarán presentando resultados de otras GCR del CENACE, donde se utilicen otras metodologías y sus resultados y comparativas, en los pronósticos de la GCROC.

REFERENCIAS

- [1] S. Parkpoom, G.P. Harrison and J.W. Bialek, "Climate change impacts on electricity demand", 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. Vol 3. IEEE.
- [2] Kothari y Nagrath, "Sistemas eléctricos de potencia", editorial McGraw Hill, tercera edición, páginas 531 a 555.
- [3] CENACE, "Guía operativa del pronóstico de corto plazo de generación intermitente", inédito.
- [4] C. Narvaez Pérez, D. García Conejo, C. Narvaez Pérez y C. Blanco Gómez, "Consecuencias electro-económicas, ambientales y sociales del abatimiento eficiente de una central hidroeléctrica (C. H. Santa Rosa, CFE-ACO)", 10o. Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, AMIME-IEEE, p 1-7 marzo 2013, IE-32.
- [5] C. Narvaez Pérez, V. Ortiz Muro y H. Moreno López, "Pronóstico de carga en los SEP considerando la influencia de los cambios de temperatura", 5o. Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, AMIME-IEEE, p 1-10 octubre 2007, IE-27.
- [6] C. Narvaez Pérez, D. García Conejos, P. Ramírez Peredo y C. Blanco Gómez, "Disparos trifásicos y de recierre monopolar en la red troncal de 400 kV del área de control occidental, CFE, y su probabilidad normal de ocurrencia", 10o. Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, AMIME-IEEE, p 1-5 marzo 2013, IE-32.
- [7] H. Moreno López, C. Narvaez Pérez, E. Rivero Cervantes y V. Ortiz Muro, "Propuesta para pronóstico de demanda horaria mediante RNA considerando la influencia de los cambios de temperatura" RVP-AI/2007, Acapulco, Guerrero, 8-14 de julio de 2007, p 1-6.

BIOGRAFÍAS



CAMILO NARVAEZ PÉREZ, egresado de la Universidad de Guadalajara como ingeniero mecánico electricista (1997), maestro en ciencias en el área de ingeniería eléctrica en el CINVESTAV Unidad Guadalajara (2000). Licenciado en Matemáticas (2022) en la UnADM, doctor en ciencias de la educación (2023) en la Universidad Santander. Ha laborado desde el 2002 en el Centro Nacional de Control de Energía, CENACE, como analista de redes eléctricas, en

aplicaciones de potencia y en evaluación y estadística, además de ser profesor de ingeniería en diversas universidades e institutos. Su área de interés es sobre los transitorios electromagnéticos, pronóstico de carga y la generación alternativa de energía eléctrica (MHD, eólica, solar y biomasa, principalmente).

Cambios en el Consumo de Energía Eléctrica en Hogares: Análisis de las Cargas

JESÚS MÁRTINEZ PATIÑO¹, JOSÉ MERCED LOZANO GARCÍA¹, ALEJANDRO PIZANO MARTÍNEZ¹, IVÁN ABEL HERNÁNDEZ ROBLES¹

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica. División de Ingenierías. Campus Irapuato-Salamanca. Universidad de Guanajuato

jesusmp23@ugto.mx,

jm.lozano@ugto.mx,

apizano@ugto.mx,

ia.hernandez@ugto.mx

RESUMEN. En las casas-habitación y edificios residenciales se tienen diferentes tipos de cargas eléctricas; obviamente asociadas al consumo de energía eléctrica, las cuales pueden ser transitorias, variables o constantes en función del tiempo de uso. Hay una gran variabilidad de cargas que van incidiendo en su consumo de energía eléctrica según distintos factores tales como los hábitos de los usuarios, el tipo y número de electrodomésticos, la infraestructura habitacional, el contexto socioeconómico, entre otros. Además, variables como la hora del día, condiciones climáticas y eventos globales, como la pandemia de COVID-19, afectan los patrones de demanda. Para conocer los patrones de consumo de estas cargas buscando una mejor gestión energética, se han desarrollado modelos de predicción los cuales se basan en un aprendizaje automático, así como tecnologías domóticas y medidores inteligentes que permiten un monitoreo y control más eficiente del consumo eléctrico. Las cargas eléctricas en los hogares también pueden clasificarse según su naturaleza (resistiva, inductiva, electrónica), su comportamiento (permanente, temporal, intermitente). En particular, las cargas constantes, como refrigeradores, módems y dispositivos en “*modo de espera*” (*standby*, en inglés) aunque individualmente se identifican de bajo consumo, representan una parte significativa del gasto energético por su funcionamiento continuo; lo cual es parte de lo que se analizará en este trabajo.

PALABRAS CLAVE— Cargas eléctricas, casas-habitación, electrodomésticos, consumo de electricidad.

I. INTRODUCCIÓN

En este artículo de revisión bibliográfica se busca conocer el comportamiento del consumo de electricidad en los hogares, dado a que es un fenómeno complejo y multifactorial que ha cobrado creciente relevancia en el contexto de la eficiencia energética, en el marco del análisis de las cargas eléctricas que se están introduciendo con las tecnologías emergentes.

En el estado del arte sobre la temática se ha identificado que las cargas eléctricas en este tipo de construcciones dependen de muchos factores, por ejemplo: hábitos-patrones de consumo, cantidad de usuarios, el tipo, tecnología y cantidad de electrodomésticos, características de la vivienda, el clima y el entorno socioeconómico [1] [2]. En este contexto, es también factor, las condiciones y variaciones que se dan de las cargas eléctricas en cada país, región e incluso por sus franjas horarias.

Es importante resaltar que la evolución tecnológica y el desarrollo económico juegan un papel importante en la introducción de más cargas eléctricas, lo cual ha impulsado cada vez más la penetración de electrodomésticos con tecnología inteligente y cargas con características de conexión y uso de energía eléctrica de manera permanente; lo cual, ha ido modificando sustancialmente los perfiles de

consumo. Electrodomésticos como refrigeradores, lavadoras y televisores, que se han vuelto casi omnipresentes, son equipos que suman de manera importante al consumo eléctrico doméstico, especialmente cuando se consideran los cambios tecnológicos y la multiplicación de dispositivos por hogar [3].

En el presente trabajo, también se citan la clasificación de las cargas eléctricas según características resistivas, inductivas, electrónicas; lo cual permite analizar de forma más precisa los efectos que estos aparatos tienen sobre el sistema eléctrico del hogar [4]. En particular, las cargas constantes o permanentes, como refrigeradores, módems o dispositivos en modo *standby*, representan una fracción considerable del consumo energético total debido a su funcionamiento continuo [5], según se ha reportado en la literatura. Su impacto acumulado, aunque muchas veces inadvertido, plantea desafíos para la eficiencia energética, especialmente cuando se utilizan equipos poco eficientes [6].

Para enfrentar estos retos, se han desarrollado herramientas como medidores inteligentes, sistemas de automatización doméstica y modelos de predicción que utilizan el modelo de aprendizaje automático, que permiten mejorar la gestión del consumo energético en el hogar [7-10]. Además, el comportamiento demográfico, las políticas

públicas y eventos globales como la pandemia de COVID-19 también han influido en la forma y frecuencia del uso eléctrico en los hogares [11][12].

En este contexto, resulta fundamental analizar las características del consumo eléctrico residencial y sus componentes, con énfasis en las cargas permanentes, para proponer estrategias efectivas de gestión energética y de alguna manera contribuir al diseño de políticas públicas sostenibles.

II. CARACTERÍSTICAS DE LOS CONSUMOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN HOGARES

En las casas y edificios residenciales los consumos de energía eléctrica varían por múltiples condiciones y características entre los que destacan la cantidad y los hábitos de consumos de los usuarios, el tipo, uso y cantidad de electrodomésticos, la infraestructura de la vivienda y el contexto socioeconómico. También es necesario mencionar que las cantidades de consumo varían significativamente entre países, regiones y horarios; de manera particular habrá que destacar el ámbito del horario debido a que especialmente durante los picos de demanda en las mañanas y las noches, cuando se concentran actividades como la cocción de alimentos, el entretenimiento y el uso de iluminación y calefacción [1] [2].

En el marco de conocer la cantidad de demanda de potencia y consumo de electricidad, es necesario citar que existen técnicas de modelado y aprendizaje automático para identificar la demanda, lo cual ayuda a mejorar la eficiencia energética [7] [8] [13]. Estas técnicas consideran elementos importantes como la hora del día, el clima, la ocupación del hogar y el tipo de aparatos eléctricos en uso. Además, también hay tecnologías domóticas que permiten automatizar y controlar el consumo eléctrico, aportando beneficios en términos de ahorro energético y confort [9]. Asimismo, los medidores inteligentes facilitan la visualización y análisis del consumo en tiempo real, promoviendo una mejor gestión del uso eléctrico por parte del usuario [10].

Como se ha citado en párrafos anteriores, la cantidad de consumo de electricidad en los hogares también se ve influido por variables demográficas, como el número de personas por hogar, la edad de los ocupantes y el nivel educativo, los cuales afectan la frecuencia y forma de uso de los aparatos eléctricos [11] [14]. Además, estudios han demostrado que las políticas energéticas y situaciones de impacto mundial como fue el caso de la pandemia de COVID-19, alteran sustancialmente los patrones de consumo al modificar la presencia de personas en casa durante el día [12].

A lo largo de las últimas décadas, la penetración de los electrodomésticos en las casas habitación ha aumentado significativamente, influenciada por el crecimiento económico, la urbanización y las políticas de eficiencia energética. Los refrigeradores fueron los primeros en

alcanzar una presencia casi universal en hogares, superando el 90 % en países desarrollados desde los años 70's, y alcanzando niveles similares en regiones urbanas de países en desarrollo hacia el año 2000 [3]. Para el caso de las lavadoras siguieron una situación similar, entrando a un 80 % aproximadamente en hogares europeos y norteamericanos desde fines de los años 90's, mientras que en economías emergentes su presencia aumentó de forma acelerada durante la primera década del siglo XXI. En cambio, las secadoras de ropa han tenido una adopción más lenta y desigual, más comunes en países con climas fríos o húmedos. Otro electrodoméstico importante desde el punto de vista de carga eléctricas, son los televisores los cuales han estado presentes de manera importante y creciente en los hogares desde los años 80's, pero lo más relevante ha sido la transición tecnológica: de televisores de tubo (CRT) a pantallas planas y luego a televisores inteligentes (smart TVs). Esta evolución ha venido acompañada de un aumento en la cantidad de unidades por hogar, con múltiples dispositivos en uso desde los años 2000. Otros electrodomésticos como microondas y lavavajillas que tienen alto consumo de energía eléctrica comenzaron a popularizarse a partir de los años 90; actualmente, en muchos países desarrollados, su penetración supera el 60 %, aunque aún no son tan prioritarios como los electrodomésticos esenciales [3][15]. Se ha identificado que en hogares rurales de China la adopción de electrodomésticos está altamente correlacionada con el nivel educativo, el ingreso familiar y el tamaño del hogar. Refrigeradores y lavadoras son considerados prioritarios en esos contextos. Además, políticas públicas como es el caso del programa *ENERGY STAR* han fomentado la introducción de electrodomésticos eficientes sin reducir la tasa de inserción.

III. CARGAS ELÉCTRICAS EN LOS HOGARES

Las cargas eléctricas en los hogares se pueden clasificarse según su naturaleza, comportamiento en el tiempo, y tipo de aparato. Se puede decir que las principales categorías serían las cargas resistivas, inductivas, capacitivas y electrónicas, cada una con características técnicas y efectos específicos sobre el sistema eléctrico de la casa-habitación o edificio residencial [9].

Como se sabe, las cargas resistivas en los hogares están presentes en electrodomésticos como las estufas, las planchas, en calentadores de agua y en otros utensilios como las planchas y secadoras de cabello, entre otros; en resumen, estos equipos-dispositivos convierten la energía eléctrica en calor. Por su parte, las cargas inductivas están presentes en los electrodomésticos como refrigeradores, lavadoras y aires acondicionados y otros más; en este caso este tipo de electrodomésticos, contienen motores eléctricos que generan reactancia, disminuyendo el factor de potencia y aumentando la demanda de energía reactiva [9]. Por otro lado, las cargas electrónicas están presentes en los televisores, computadoras, routers y otros más; para estos equipos y dispositivos presentan patrones de consumo más constantes y que a la vez

generan distorsiones armónicas debido a su electrónica de potencia interna [16]. Estas cargas son cada vez más comunes y, aunque su consumo individual puede ser bajo, su uso extendido contribuye significativamente al consumo total; esta temática es importante siendo parte de lo que se revisará en párrafos más adelante.

Existe otra clasificación de las cargas eléctricas que son llamadas permanentes, temporales e intermitentes. Las permanentes son aquellas que están conectadas y en uso constante, como refrigeradores y módems. Las temporales se utilizan por periodos cortos y específicos, como planchas o microondas. Las intermitentes operan en ciclos automáticos, como lavadoras o calentadores eléctricos. Esta clasificación es clave para analizar el consumo energético, planificar la demanda y mejorar la eficiencia eléctrica del hogar [4][5][9].

IV. CARGAS CONSTANTES

Las cargas permanentes en casas habitación son aquellos aparatos o dispositivos eléctricos que se encuentran conectados y funcionando de manera continua o por largos periodos, independientemente de la intervención directa del usuario. Estas cargas mantienen un consumo eléctrico estable en el tiempo, lo que las convierte en un componente clave del consumo base de electricidad en los hogares.

Entre las principales cargas permanentes se encuentran los refrigeradores, congeladores, módems de internet, dispositivos en *modo de espera* (*stand-by*) como televisores, decodificadores y algunos electrodomésticos que mantienen funciones activas aun sin ser utilizados directamente. Estos aparatos, aunque muchos no tienen un alto consumo individual, al mantenerse conectados durante todo el día, suman de manera significativamente al consumo mensual de electricidad [4] [5]. El consumo de estas cargas es predecible y uniforme, lo que permite incluirlas con mayor certeza en modelos de predicción de demanda eléctrica. Por su comportamiento estable, estas cargas permiten a los sistemas eléctricos planificar el suministro energético base, y son menos sensibles a los cambios en los hábitos de los usuarios o a la variabilidad horaria [7] [8].

No obstante, el impacto acumulativo de las cargas permanentes no debe subestimarse. Un número elevado de dispositivos conectados constantemente, especialmente si no son eficientes energéticamente, puede generar un consumo innecesario. Este fenómeno se agrava por el uso prolongado de equipos con transformadores internos o cargadores que siguen consumiendo energía incluso cuando no se están utilizando activamente [6]. Asimismo, la presencia de cargas constantes plantea desafíos en la implementación de estrategias de eficiencia energética, ya que, al no depender de la acción consciente del usuario, pasan desapercibidas en los intentos de reducción del consumo. En este sentido, tecnologías como sistemas domóticos o medidores inteligentes permiten identificar estas cargas y gestionar su uso de forma más eficiente, mediante la automatización del apagado o programación de horarios [9] [10].

Es posible citar que, en países desarrollados, hubo un aumento en las cargas permanentes o constantes desde los inicios de siglo [17], comenzando con equipos de comunicación como los modem/router, las puertas eléctricas para vehículos con motor eléctrico, sistemas de seguridad (como las alarmas, sensores, cámaras), iluminación de emergencia o de pasillo.

En resumen, las cargas permanentes son esenciales en la estructura del consumo eléctrico residencial. Aunque no son necesariamente las más potentes, su uso continuo representa una porción significativa del gasto energético del hogar.

V. DISCUSIÓN

Según datos de la búsqueda bibliográfica se ha logrado calcular que las cargas constantes pueden llegar en un año de hasta una cantidad de 1210.788 kWh [17-26]; así mismo, para el caso de México se ha calculado un consumo anual 1737 kWh [27] para una casa-habitación promedio para mediados de la década pasada, lo cual las cargas permanentes pueden llegar a representar casi el 70%. Es decir, las tecnologías emergentes en su mayoría son cargas permanentes de consumo de energía eléctrica, lo cual es una tendencia a nivel mundial en su incorporación en los hogares.

Se puede citar que ha habido una transición de cargas eléctricas en los hogares, pasando de cargas intermitentes como el caso de los focos incandescentes e incluso con tecnología LED, a cargas permanentes como los focos o refrigeradores inteligentes como dos casos de ejemplo. Además, del creciente tema de seguridad pública también ha incrementado el uso de cargas permanentes como las video cámaras, monitores y otros sistemas que ayudan en el tema de seguridad en el hogar.

Desde el punto de vista de datos de la exploración documental, es importante dar seguimiento a la introducción de equipos y dispositivos con consumo de energía eléctrica permanente para una mejor gestión energética en el hogar.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha expuesto de manera general que el consumo de energía tiene múltiples factores en las casas-habitación y edificios residenciales. En una búsqueda bibliográfica se ha identificado que en los últimos años aumentaron las cargas que operan de manera continua, lo cual conlleva a una modificación del perfil de consumo eléctrico que se tenía décadas atrás.

Las llamadas cargas constantes o permanentes donde interviene la inteligencia artificial se ha comenzado a incrementar en los hogares según datos de la búsqueda bibliográfica, para el caso de México estarían muy cerca de que este tipo de cargas lleguen incluso a casi el 70% del consumo de una casa promedio en la década pasada.

Frente a este escenario, se ha identificado la importancia de integrar de igual manera tecnologías como los medidores

inteligentes, los sistemas domóticos y los modelos de predicción basados en inteligencia artificial para lograr una gestión energética más eficiente.

REFERENCIAS

- [1] Lavin, C., & Julienne, H. (2025). Household activities underlying residential electricity demand: who does what during the evening peak?. *Energy Efficiency*, 18(5), 1-24.
- [2] Satre-Meloy, A., Diakonova, M., & Grünewald, P. (2020). Daily life and demand: an analysis of intra-day variations in residential electricity consumption with time-use data. *Energy Efficiency*, 13, 433-458.
- [3] Saidur, R. (2009). Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings. *Energy policy*, 37(10), 4104-4113.
- [4] Hannagan, J., Woszczeiko, R., Langstaff, T., Shen, W., & Rodwell, J. (2022). The impact of household appliances and devices: Consider their reactive power and power factors. *Sustainability*, 15(1), 158.
- [5] Ramgolan, Y. K., Veerapen, S., Oree, V., Murdan, A. P., & Soyjaudah, K. M. S. (2014, May). Energy profiles and performance of common electrical domestic appliances. In 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON) (pp. 1129-1136). IEEE.
- [6] Spiliotopoulos, C., Stamminger, R., & Siderius, H. P. (2019). Bringing the home in the lab: consumer-relevant testing for household electrical products. *Energy Efficiency*, 12, 281-298.
- [7] Haq, M. R., & Ni, Z. (2019, May). Classification of electricity load profile data and the prediction of load demand variability. In 2019 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT) (pp. 304-309). IEEE.
- [8] Wu, Z., Qi, M., Zhang, W., Zhang, X., Yang, Q., Zhao, W., ... & Wang, Z. (2025). The Electricity Load Prediction Model for Residential Buildings: A Critical Review of Output Types, Prediction Methods and Driving Factors. *Buildings*, 15(6), 925.
- [9] Hernández González, J. S., Martínez Bermúdez, R., & Padilla Trujillo, S. (2022). Desarrollo de un sistema domótico de control inalámbrico de cargas eléctricas.
- [10] Camacho, J. L. H., & Ojeda, D. L. A. (2022). Análisis y visualización de datos de un medidor inteligente para estimar el consumo de electricidad. *Jóvenes en la Ciencia*, 16.
- [11] Huuki, H., Ruokamo, E., Kopsakangas-Savolainen, M., Belonogova, N., Sridhar, A., & Honkapuro, S. (2024). House and socio-demographic features vs. electricity consumption time series in main heating mode classification. *The Electricity Journal*, 37(2), 107373.
- [12] Krarti, M., & Aldubyan, M. (2021). Review analysis of COVID-19 impact on electricity demand for residential buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110888.
- [13] Rodrigues, F., Carreira, C., Calado, J. M., & Melicio, R. (2023). Short-term load forecasting of electricity demand for the residential sector based on modelling techniques: a systematic review. *Energies*, 16(10), 4098.
- [14] Lakshmi, V. V., & Paul, M. M. (2019). Electrical Appliance Usage and Electricity Consumption Pattern at household level. *Journal of Krishi vigyan*, 7(2), 110-114.
- [15] Zou, B., & Mishra, A. K. (2020). Appliance usage and choice of energy-efficient appliances: Evidence from rural Chinese households. *Energy Policy*, 146, 111800.
- [16] Meier, A., & Aillot, Q. (2022). Permanent electrical loads in new homes. eScholarship, University of California.
- [17] Romero, M., Salazar, P., Comina, M., & Verdugo, A. (2024). Advanced IoT Architecture for Energy Optimization and Intelligent Device Management in Smart Environments.
- [18] Proedrou, E. (2021). A comprehensive review of residential electricity load profile models. *IEEE Access*, 9, 12114-12133.
- [19] Mandlem, K. (2018). Energy efficiency effectiveness of smart thermostat based BEMS. West Virginia University.
- [20] Phuchamniphattananun, A., & Pora, W. (2019, November). A smart domestic refrigerator with energy efficiency improvement. In 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS) (pp. 345-348). IEEE.

- [21] Izudi, W. I. H. W., Kutty, S. B., Kassim, M., & Saaidin, S. (2022, July). Energy Saving of Electrical Appliances Through Mobile Application. In 2022 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications (ISIEA) (pp. 1-5). IEEE.
- [22] Obioma, P., Agbodike, O., Chen, J., & Wang, L. (2025). ISLS: IoT-Based Smart Lighting System for Improving Energy Conservation in Office Buildings. *arXiv preprint arXiv:2503.13474*.
- [23] Naderiparizi, S., Hessar, M., Talla, V., Gollakota, S., & Smith, J. R. (2017). Ultra-low-power wireless streaming cameras. *arXiv preprint arXiv:1707.08718*.
- [24] Fagan, M., Yang, M., Tan, A., Randolph, L., & Scarfone, K. (2019). Security review of consumer home Internet of Things (IoT) products (No. NIST Internal or Interagency Report (NISTIR) 8267 (Draft)). National Institute of Standards and Technology.
- [25] Alsalemi, A., Himeur, Y., Bensaali, F., & Amira, A. (2021). Appliance-level monitoring with micro-moment smart plugs. In *Innovations in Smart Cities Applications Volume 4: The Proceedings of the 5th International Conference on Smart City Applications* (pp. 942-953). Springer International Publishing.
- [26] Bel, A., Adame, T., & Bellalta, B. (2018). An energy consumption model for IEEE 802.11 ah WLANs. *Ad Hoc Networks*, 72, 14-26.
- [27] Oropeza-Perez, I., & Petzold-Rodriguez, A. H. (2018). Analysis of the energy use in the Mexican residential sector by using two approaches regarding the behavior of the occupants. *Applied Sciences*, 8(11), 2136.

BIOGRAFÍAS



Guanajuato (F.I.M.E.E.) (1997-2002).

JESÚS MARTÍNEZ-PATIÑO Doctorado en Energías Renovables y Eficiencia Energética (2008). Egresado del Master en Ecoeficiencia, Ahorro Energético y Ecología Industrial (2003-2004) en la Universidad de Zaragoza (España). Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de



Guanajuato (F.I.M.E.E.) (1997-2002).

JOSÉ M. LOZANO-GARCÍA Recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2003, y el título de Maestro y Doctor en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2006 y 2011, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses de investigación incluyen convertidores de energía, microrredes y redes inteligentes.



Guanajuato (F.I.M.E.E.) (1997-2002).

ALEJANDRO PIZANO MARTINEZ Recibió el título de Ingeniero Mecánico Electricista de la Universidad de Colima, Colima, México en 2001, y los grados de Maestría y Doctorado Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, en 2004 y 2010, respectivamente. Es Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, México. Sus intereses de investigación se centran en la operación óptima, el análisis dinámico y de estado estable de los sistemas de energía modernos.



Guanajuato (F.I.M.E.E.) (1997-2002).

IVAN A. HERNÁNDEZ ROBLES Doctor en Ciencias en Sistemas Eléctricos por el CINVESTAV Unidad Gdl., México, 2013. Se desempeñó como Senior Diseñador de Transformadores de Distribución en la empresa Cooper Power by EATON, su adscripción actual en el departamento de Ingeniería Eléctrica de la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato. Su línea de investigación se enfoca en electromagnetismo, diseño de máquinas eléctricas para renovables, generación inalámbrica, generación distribuida.

Plataforma de Monitoreo Energético con IA y NILM para Reducción de Costos en Pequeñas Industrias

ARMANDO JIMÉNEZ-ZAVALA, JOEL SALOME-BAYLON.

Universidad Tecnológica de Manzanillo
armandojz@gmail.com
joel-salome@utem.edu.mx

RESUMEN La presente investigación describe una plataforma de monitoreo energético económica, basada en Monitoreo Energético No Intrusivo (NILM) e Inteligencia Artificial (IA) para mejorar la eficiencia energética en pequeñas industrias. Emplea medidores industriales de bajo costo para recopilar y procesa datos en tiempo real, desagregando consumos y prediciendo demandas. Esta solución escalable fomenta la sostenibilidad y minimiza gastos operativos.

PALABRAS CLAVE — monitoreo energético, eficiencia energética, transformación digital.

I. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética representa un pilar esencial en la industria, ya que fomenta la sostenibilidad, reduce costos y mitiga emisiones de carbono. Para este propósito, el monitoreo energético se ha consolidado como una herramienta fundamental en la gestión eficiente de recursos energéticos.

No obstante, las micro y pequeñas empresas enfrentan barreras para monitorear el consumo energético debido a los altos costos y la complejidad de los sistemas tradicionales. Es aquí donde los sistemas de monitoreo energético de bajo costo pueden ser herramientas esenciales para identificar patrones de consumo e ineficiencias, promoviendo una gestión inteligente de la energía [1].

Los sistemas tradicionales de monitoreo suelen ser costosos y complejos, lo que limita su adopción. En respuesta, el desarrollo de alternativas basadas en tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA) y el monitoreo energético no intrusivo (NILM, por sus siglas en inglés: *Non Intrusive Load Monitoring*), ofrecen una solución accesible para transformar la gestión energética en pequeñas industrias.

Las técnicas NILM permiten desagregar el consumo energético total de un edificio en el uso individual de cada dispositivo, utilizando un único punto de medición, lo que reduce significativamente los costos de implementación y mantenimiento en comparación con los sistemas tradicionales que requieren sensores en cada aparato [2]. Esto reduce significativamente los costos y la complejidad de una

implementación de monitoreo energético, haciendo que sea más accesible para implementaciones a gran escala [3], [4].

Por su parte, los algoritmos de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (AA) han demostrado un potencial transformador para mejorar la eficiencia energética al analizar grandes volúmenes de datos energéticos para predecir demandas, detectar patrones de consumo ineficientes y optimizar sistemas como la calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). Los modelos de AA pueden estimar la demanda de energía futura, detectar la ocupación en tiempo real y optimizar el confort térmico, lo que permite un control más preciso y eficiente de los sistemas HVAC. Estudios recientes han reportado reducciones de hasta un 20% en el consumo energético mediante la aplicación de modelos de AA en edificios, logrando hasta un 95.3% de exactitud en la detección de ocupación y con ahorros de hasta un 52% en sistemas HVAC [5].

Este trabajo desarrolla una plataforma de monitoreo energético económica, integrando IA y NILM para optimizar consumos en pequeñas industrias. Esta es una investigación en desarrollo, basada en resultados iniciales de análisis de consumos y selección de quipos de bajo costo, presentados en [3].

La plataforma propuesta utiliza medidores de energía robustos y accesibles que miden flujos bidireccionales de energía, ideales para la inclusión de generación distribuida, como es el caso de un sistema fotovoltaico. Los datos recopilados se procesan mediante una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi, con capacidades de preprocesamiento, almacenamiento y transmisión web, permitiendo un análisis

en tiempo real para identificar áreas de oportunidad en la gestión energética.

Este enfoque no solo es económicamente viable, sino que también sienta las bases para la transición hacia edificios industriales inteligentes, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y reducción de la huella de carbono.

El presente artículo describe el desarrollo, implementación y resultados de esta plataforma, destacando su capacidad para generar indicadores clave de rendimiento (KPIs) que apoyen la toma de decisiones económicas diarias. Además, se abordan los desafíos técnicos, como la precisión de NILM en tiempo real y la escalabilidad de las soluciones propuestas, y se evalúa su impacto en la reducción de costos operativos en pequeñas industrias. Con base en investigaciones recientes, esta propuesta busca contribuir al avance de la gestión energética inteligente, ofreciendo una solución accesible y escalable para un sector crítico en la economía global.

La selección del monitor de energía se basa en la seguridad y precisión de la información que recopila, utilizando medidores de energía de grado industrial de gama baja. Se establece una arquitectura que permite recolectar datos de consumo de energía del edificio, considerando la operación de carga en cuatro cuadrantes, es decir, medición de flujo de potencia bidireccional. Esto es particularmente relevante en edificios con fuentes de energía renovable, como paneles solares, donde el flujo de energía puede ser tanto de consumo como de retorno a la red.

Los resultados de esta investigación muestran áreas de oportunidad que pueden identificarse rápidamente basadas en el análisis de la información recopilada, verificando la viabilidad económica en la implementación de un sistema de monitoreo energético y sentando las bases para la operación de un edificio inteligente.

Esto incluye la provisión de indicadores clave de rendimiento (KPIs) para decisiones económicas diarias, como la optimización del uso de energía durante horas punta o la planificación de mantenimiento preventivo basado en patrones de consumo.

Entre las ventajas principales de la plataforma propuesta, con respecto a otros estudios, se encuentra la capacidad de incluir mediciones bidireccionales, análisis a partir de un solo punto de medición y la capacidad de operar de forma local mediante el procesamiento, análisis y presentación de resultados sin depender de almacenamiento en la nube o de otros dispositivos adicionales.

Una ventaja crucial para esta implementación radica en la disponibilidad de una diversidad de variables eléctricas más allá de sólo el consumo de energía o la potencia activa. La implementación propuesta permite disponer de la información correspondiente a voltajes y corrientes por fase, frecuencia, factor de potencia, energía consumida y

generada, potencia activa por fase y potencia aparente. La mayoría de los dispositivos de bajo costo comerciales limitan la disponibilidad de información al usuario final y sólo permiten conocer la potencia activa, voltajes, energía consumida y generada.

A. AVANCES EN SISTEMAS DE BAJO COSTO

Los avances tecnológicos recientes han permitido desarrollar sistemas de monitoreo energético de bajo costo que combinan precisión y accesibilidad. El uso de hardware de bajo costo, como enchufes inteligentes o medidores básicos de energía pueden llevar a importantes reducciones en el consumo al visibilizar los comportamientos que afectan la eficiencia energética. Tal es el caso de estudio presentado en [6], donde se empleó hardware con un costo de USD \$13 para la medición del consumo en potencia activa y se logró una reducción del 12% en el consumo promedio de energía durante un ensayo de cinco semanas.

Otro estudio presenta un sistema de monitoreo basado en IoT para edificios, utilizando enchufes inteligentes que proporcionan datos precisos de consumo con baja desviación, permitiendo a los usuarios controlar su consumo energético y reducir costos e ineficiencias [7]. Estos ejemplos ilustran cómo las tecnologías de bajo costo, como sensores y gateways IoT, están haciendo que la monitorización sea más accesible, especialmente para implementaciones a gran escala.

B. INTEGRACIÓN DE NILM, IA Y AA

1. Integración de NILM.

NILM funciona analizando cambios en el voltaje y la corriente RMS en un panel eléctrico monitoreado, identificando patrones asociados con el encendido y apagado de aparatos, con aplicaciones en conservación de energía, automatización del hogar inteligente, respuesta a la demanda y gestión energética de edificios.

Los métodos de NILM se dividen en estadísticos y de aprendizaje automático, con técnicas como autoencoders alcanzando un F1 score del 55% y redes neuronales profundas (CNN) logrando hasta un 84% de precisión [8].

En este sentido. La aplicación de técnicas NILM puede reducir el número de sensores necesarios, actuando como un "sensor blando" para la separación de señales energéticas, lo que lo hace ideal para auditorías energéticas de bajo costo. Sin embargo, desafíos como la precisión en tiempo real y la intrusión en la privacidad siguen siendo áreas de investigación activa.

2. Rol de la Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático.

De acuerdo con lo analizado en [9], se sugiere que la IA tiene el potencial de reducir el consumo energético y las emisiones de carbono en edificios comerciales en al menos

un 8%, apoyando objetivos de eficiencia energética y sostenibilidad. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías enfrenta desafíos, como la falta de estudios en edificios reales con evaluaciones post-ocupación y la necesidad de métricas consistentes para seleccionar modelos óptimos.

II. DESARROLLO

La plataforma de monitoreo energético se compone de tres elementos principales: hardware de medición, sistema de procesamiento de datos e interfaz de usuario. El hardware incluye medidores de energía de bajo costo que recopilan datos de consumo energético activo y reactivo, voltajes, corrientes, factor de potencia y potencia instantánea. También soportan flujos de potencia bidireccionales, ideales para pequeñas industrias con fuentes renovables.

Se empleó el medidor de energía modelo IEM3255 de Schneider Electric, que tiene la capacidad de medir los flujos de energía en el tablero eléctrico principal o en subpaneles. Este dispositivo cumple con los requisitos para monitoreo de consumo y evaluación de elementos energéticos, como costos y contabilidad, y puede apoyar incentivos de ahorro energético [10].

Los medidores IEM3255 proporcionan mediciones esenciales como corriente, voltaje y energía para instalaciones monofásicas o trifásicas como se muestra en Fig. 1 y Fig. 2. Además, soportan la comunicación vía protocolo Modbus, facilitando la integración con sistemas de control y monitoreo.

Al analizar la demanda energética de un edificio, se encuentra una mezcla de cargas resistivas, capacitivas, inductivas o combinadas. Esto se procesa mediante la adquisición de las lecturas en potencia activa y reactiva

El medidor de energía registra información en los cuatro cuadrantes de potencia real y reactiva para calcular la potencia aparente, funcionando como un medidor bidireccional. Las combinaciones específicas de medición se presentan en Fig. 3.

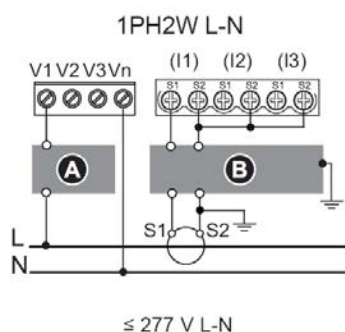


Fig. 1. Conexión eléctrica para monitoreo monofásico.

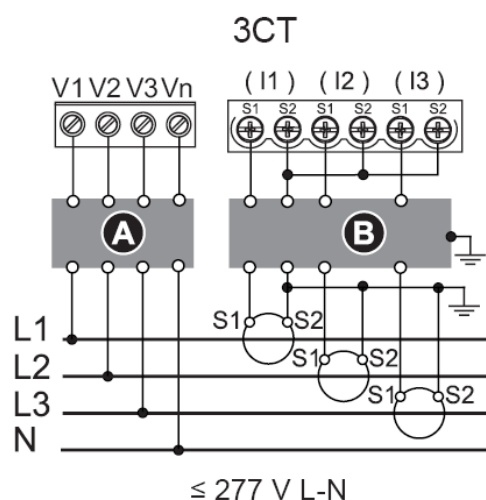


Fig. 2. Conexión eléctrica para monitoreo trifásico.

En la capa asociada al sistema de procesamiento de datos, se seleccionó Raspberry Pi, que es una computadora de placa única compacta y de bajo costo [11]. Gracias a la gran capacidad de cómputo del modelo Raspberry Pi 4 B, que es posible realizar preprocesamiento de datos, almacenamiento de respaldo y envío de las lecturas a través de la web, facilitando el acceso remoto y el análisis en tiempo real. De manera complementaria, la Raspberry proporciona los medios para visualización in situ de la información, ya que es posible conectar periféricos como un monitor, teclado, ratón, etc., operando como una minicomputadora de escritorio.

Finalmente, las lecturas se analizan para identificar patrones de consumo y áreas de oportunidad en eficiencia energética. Se desea que los dispositivos aseguren mediciones confiables, esenciales para la toma de decisiones informadas.

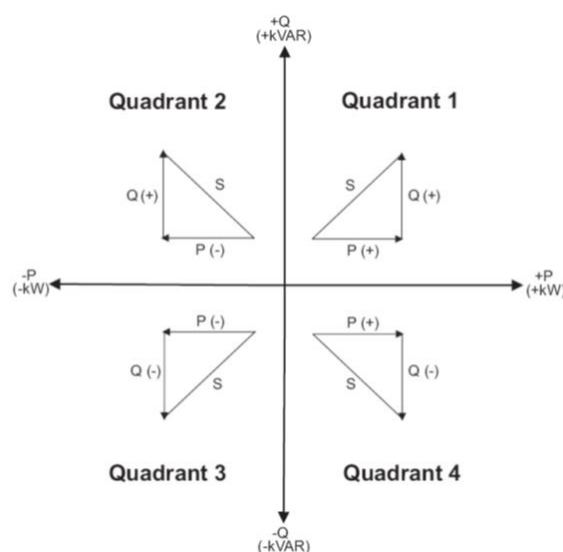


Fig. 3. Mediciones energéticas de cuatro cuadrantes.

III. PLATAFORMA DE MONITOREO

A. ARQUITECTURA

La arquitectura de la plataforma de monitoreo energético en desarrollo se integra por varios componentes en tres capas principales: hardware de medición, sistema de procesamiento de datos e interfaz de usuario. El hardware de medición lo integra el medidor IEM3225, que cuenta con transformadores de corriente conectados a una, dos o tres fases, según sea el caso, también cuenta con entradas de voltaje para conectar al mismo número de fases.

El sistema de procesamiento está integrado principalmente por la tarjeta Raspberry Pi modelo 4B, y por último, la interfaz de usuario está generada por las visualizaciones gráficas que pueden accesarse mediante conexión física de un monitor a la Raspberry Pi o mediante comunicación por red inalámbrica y con acceso al dashboard de presentación de resultados. Esta arquitectura se ilustra en la Fig. 4.

Para establecer la conexión entre el medidor de energía y la tarjeta Raspberry Pi se implementa una comunicación por medio de protocolo Modbus RTU. Se emplea un cable adaptador, que permite la conexión RS485 en el extremo conectado al medidor de energía y que conecta por medio de USB a la tarjeta Raspberry Pi.

El protocolo Modbus RTU es un estándar de comunicación serial ampliamente utilizado en aplicaciones industriales [12], y en esta plataforma, juega un papel esencial al facilitar la comunicación entre los medidores de energía y la Raspberry Pi. Su principal función es permitir la recolección y transmisión de datos de consumo energético desde los medidores, hacia la unidad de procesamiento donde los datos se tabulan, almacenan y pre-procesan para normalizar las lecturas, verificar tabulaciones temporales y empaquetar conjuntos de datos.

Los datos transferidos incluyen métricas críticas como potencia activa y reactiva, voltaje, corriente, factor de potencia y potencia instantánea, todos los cuales son fundamentales para generar indicadores clave de desempeño (KPIs) y tomar decisiones informadas para reducir costos energéticos. Estos paquetes de datos se almacenan en una base de datos central para su posterior análisis y procesamiento, donde se extraen patrones de consumo y métricas para la predicción de mantenimiento.

B. TABLERO DE VISUALIZACIÓN

La plataforma de monitoreo energético y su *dashboard* de visualización están diseñados para optimizar la eficiencia energética en pequeñas industrias mediante la recopilación, procesamiento y presentación de datos de consumo en tiempo real. En la Fig. 5 se muestra una visualización tipo, que integra las variables más importantes en un entorno operativo dado.

La plataforma permite generar gráficas interactivas, estadísticas detalladas y alertas automáticas ante anomalías en el consumo, facilitando la identificación de ineficiencias y la toma de decisiones informadas. Su arquitectura se basa en un modelo de microservicios, donde cada componente cumple una función específica y se comunica a través de APIs REST, garantizando escalabilidad, mantenibilidad y una integración eficiente entre módulos.

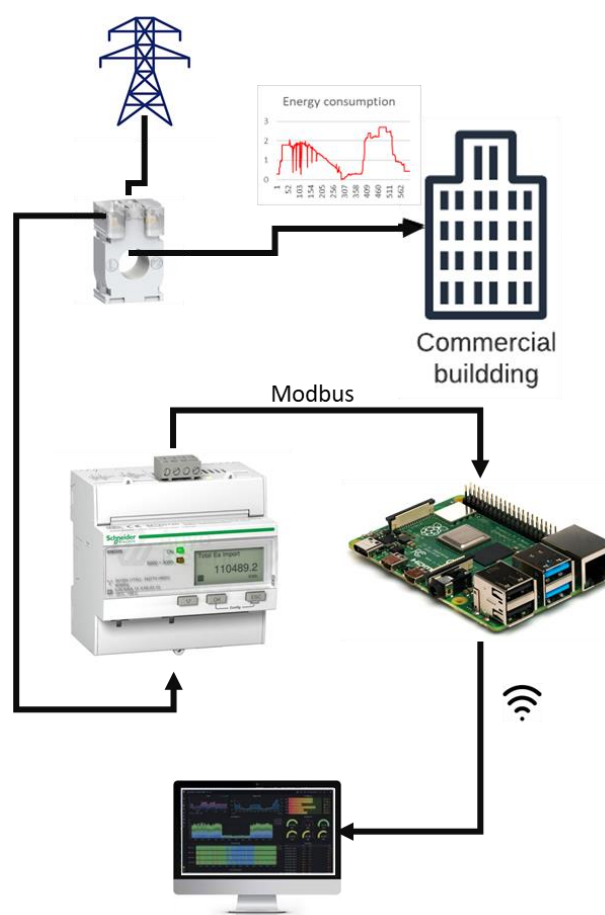


Fig. 4. Arquitectura de la plataforma de monitoreo energético.



Fig. 5. Dashboard de visualización de métricas de monitoreo.

C. CASO DE USO

La arquitectura propuesta se implementó en un edificio con diversas cargas, como bombas de agua, calentadores de agua, acondicionadores de aire e iluminación; el sitio reporta una carga conectada de 50 kW. La Fig. 6 muestra las conexiones eléctricas para el monitoreo trifásico.



Fig. 6. Monitor de energía.

La Fig. 7 muestra el comportamiento de un mes de operación. Particularmente, se presenta el dato correspondiente al flujo de potencia aparente trifásica del sitio, en el rango de tiempo que va desde 2025-05-01 00:00:00h, hasta 2025-05-31 23:59:59h.

El algoritmo de análisis de las señales arroja varias métricas durante la operación en tiempo real, comenzando por el estado de la plataforma de monitoreo, enviando alertas por corte de energía, corte en la comunicación de internet, restablecimiento de comunicación, etc.

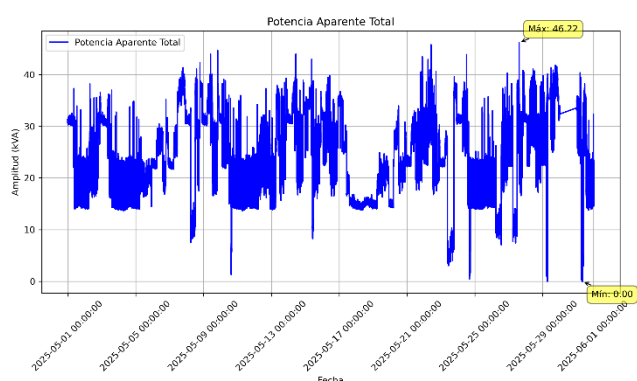
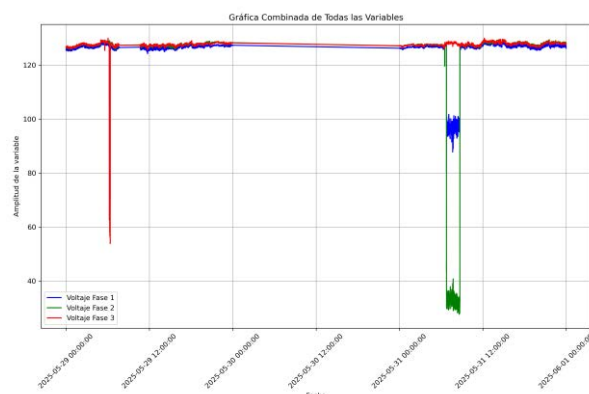


Fig. 7. Potencia aparente trifásica. De 2025-05-01 00:00:00h, hasta 2025-05-31 23:59:59h.

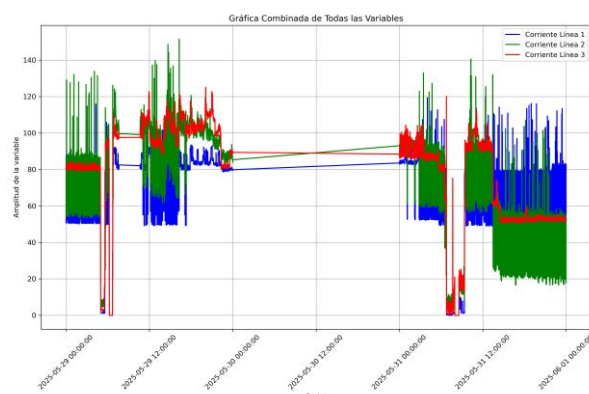
Es posible recabar datos acerca del acumulado de energía, cuando se presentan valores máximos en el consumo, o cuando se sobrepasa un umbral preseleccionado. Las áreas de oportunidad en la optimización de los consumos comienzan por mitigar los puntos críticos en la operación normal del sitio en particular. En es caso, el sitio de estudio requiere mantener la temperatura controlada en una alberca semiolímpica por lo que es de mayor importancia identificar los cortes a la energía y asegurarse de reestablecer el proceso de filtrado de agua y encendido de las bombas de calor para así reducir el impacto en el consumo de energía.

Durante la operación de mayo, se detectaron varias situaciones de afectación en la calidad del suministro eléctrico, con cortes de energía y disminuciones importantes en el voltaje que ponen en riesgo la integridad de equipos eléctricos y electrónicos sensibles.

En la Fig. 8 se muestran los voltajes de las fases 1, 2, 3 y las corrientes en línea 1, 2, 3 para el período del 2025-05-29 00:00:00h al 2025-05-31 23:59:59h. Adicional a las variaciones de voltaje y corriente, puede apreciarse la falta de comunicación durante todo el 30 de mayo, evidenciado por la línea recata que conecta los puntos finales del 29 de mayo e inicial del 31 de mayo.



a) Voltaje en Fase 1, 2 y 3.



b) Corriente de Línea 1, 2 y 3.

Fig. 8. Voltaje y corrientes trifásicas, del 2025-05-29 00:00:00h al 2025-05-31 23:59:59h.

En la Fig. 8 se puede apreciar la inyección de corriente alrededor de 65 amperes. También se observa desbalance de corrientes y la presencia de ruido en la operación presente en la Línea 1 y Línea 2. De la gráfica de voltajes cabe resaltar que no se tuvieron alertas por ausencia de voltaje en este período, pero sí por bajo voltaje, presente en las tres fases, pero con aparición en dos momentos: la fase 1 y fase 3 presentaron bajo voltaje el 29 de mayo, de las 06:14:14h restableciéndose a las 06:22:04h, mientras la fase 2 y fase 3 presentaron bajo voltaje el 31 de mayo de las 06:46:10h a restableciéndose a hasta las 08:41:57h.

En la Fig. 9 inciso (a), se muestra el comportamiento de la potencia activa durante el periodo 2025-05-29 00:00:00h al 2025-05-31 23:59:59h, mientras el inciso (b) presenta el comportamiento de la potencia aparente en el mismo periodo. Derivado de la observación de estas variaciones en el suministro eléctrico, los desbalances de corriente y la gran variación momentánea en los flujos de potencia, se están recomendado acciones correctivas para prevenir fallo en equipos, como son protecciones contra variaciones y pérdida de voltaje, realizar un censo de cargas para equilibrar el consumo entre las tres fases y la vigilancia de las buenas prácticas en el ahorro energético. Todo esto podrá verse reflejado en ahorros económicos desde un 7% hasta el 15% en la facturación anual, dado que el sitio también recibe cobros por demanda y por bajo factor de potencia.

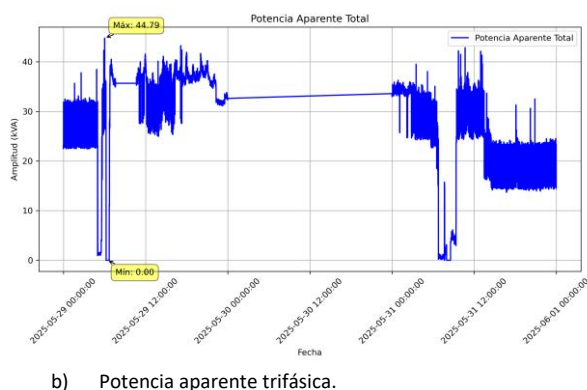
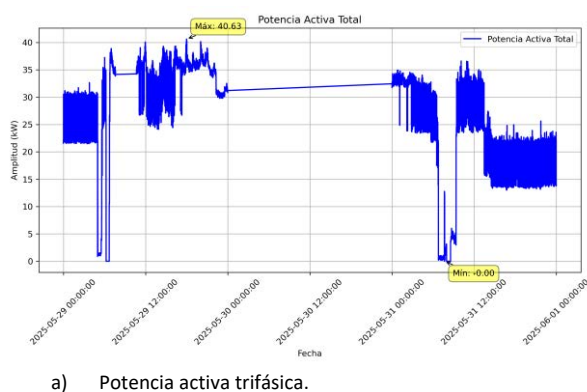
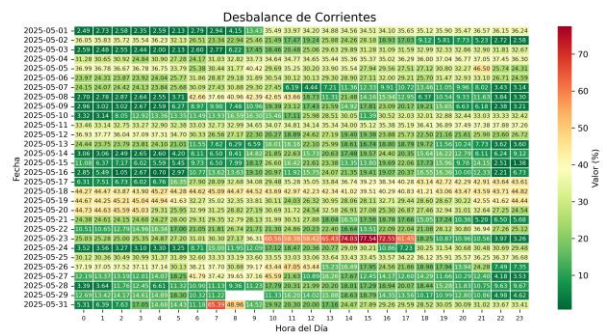


Fig. 9. Potencia activa y aparente trifásica, del 2025-05-29 00:00:00h al 2025-05-31 23:59:59h.

En la Fig. 10 inciso (a), muestra el mapa de calor generado para el análisis de desbalance de corrientes por hora para todo el mes de mayo. Este resultado confirma lo mencionado anteriormente, dado que el sitio cuenta con desbalance permanente durante su operación, debido principalmente a la activación intermitente de bombas de calor que operan a 200 volts conexión a dos fases. En el inciso (b) se muestra el análisis del desbalance de corrientes para el 2025-05-23 por minuto, que es el día con los valores más altos registrados en el mes.



a) Análisis mensual, con promedios por hora.

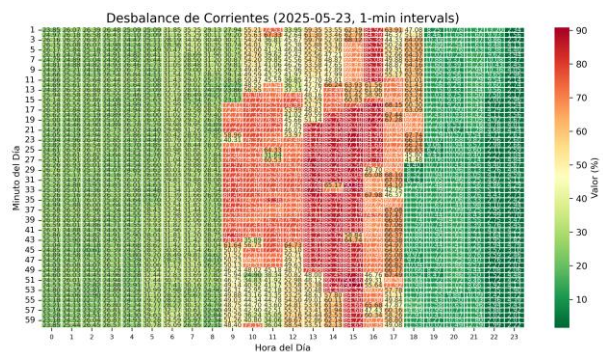


Fig. 10. Desbalance de corrientes, del 2025-05-01 00:00:00h al 2025-05-31 23:59:59h.

Para complementar el análisis anterior, se genera también mapas de calor de la potencia aparente trifásica, y particularmente la Fig. 11 presenta el correspondiente análisis para el día 2025-05-23 de las 00:00:00h a las 23:59:59h. Comparando la Fig. 10, inciso (b) con la Fig. 11 es posible observar que la operación más ineficiente se presenta particularmente alrededor del mediodía, cuando la temperatura ambiente es mayor y las bombas de calor disminuyen su operación, lo que provoca que el sistema opere desbalanceado pero con baja carga. Es posible aplicar correcciones al balancear el resto de las cargas conectadas para colocarlas en oposición a la bomba de calor que permanece encendida más tiempo.

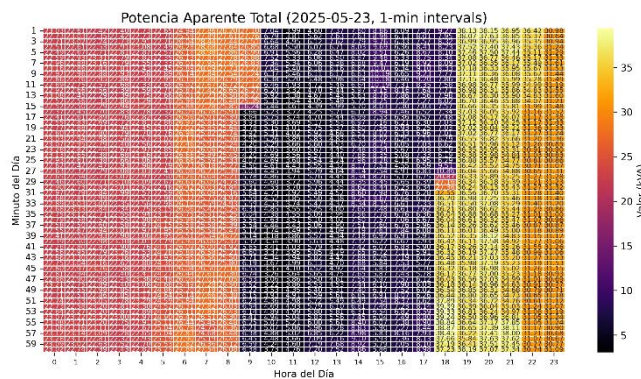


Fig. 11. Mapa de calor de la potencia aparente trifásica promedio por minuto, del 2025-05-23 00:00:00h al 2025-05-23 23:59:59h.

Por último, el algoritmo de análisis arroja también archivos de resumen con varias métricas de análisis, las cuales se presentan en la [Tabla I](#). Mediante scripts predefinidos, es posible configurar una serie de alertas para el usuario entre las que pueden estar: pérdida de voltaje, paro de equipos (caída drástica de la demanda), sobrecargas atípicas, operación fuera de calendarización, entre otras.

TABLA I. MÉTRICAS RELEVANTES DEL PERIODO DE ESTUDIO

Parámetros	Máx	Mín	Prom	Atípicos	Desv Estd
Corriente Línea1	191 A	0 A	61 A	316	19.0
Corriente Línea2	171 A	0 A	54 A	343	28.0
Corriente Línea3	177 A	0 A	71 A	25	20.0
S	55 kVA	0 kVA	23 kVA	18	8.0
f	60.6 Hz	59.3 Hz	60.0 Hz	331	0.02
Voltaje L-L	225 V	126 V	220 V	34931	4.0

Actualmente se siguen desarrollando nuevas mejoras a la plataforma, para optimizar el procesamiento de datos y el envío de alertas en tiempo real, así como la integración de algoritmos avanzados para la extracción de patrones de consumo y predicción robusta de la demanda.

IV. CONCLUSIONES

La implementación de una plataforma de monitoreo energético basada en NILM e IA representa una alternativa efectiva para mejorar la eficiencia energética en pequeñas industrias a un porcentaje del costo de implementación de otras soluciones comerciales de gran escala. Los resultados preliminares indican reducciones de hasta un 15% en el consumo energético, lo que se traduce en ahorros significativos en costos operativos. La plataforma proporciona indicadores clave de rendimiento (KPIs) que facilitan la toma de decisiones informadas, como la optimización del uso de energía en horas pico y la planificación de mantenimiento predictivo.

Además, su diseño de bajo costo y escalabilidad la hace accesible para pequeñas industrias con recursos limitados. Futuras investigaciones podrían explorar la integración de sensores ambientales para mejorar la precisión de las predicciones y el desarrollo de algoritmos de IA más avanzados para optimizar aún más la gestión energética, contribuyendo a los objetivos globales de sostenibilidad.

REFERENCIAS

- [1] M. Çolak and E. Irmak, "A State-of-the-Art Review on Electric Power Systems and Digital Transformation," *Electric Power Components and Systems*, vol. 51, no. 11, pp. 1089–1112, 2023, doi: 10.1080/15325008.2023.2189760.
- [2] G. W. Hart, "Nonintrusive appliance load monitoring," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 12, pp. 1870–1891, 1992, doi: 10.1109/5.192069.
- [3] A. Jiménez Zavala and J. Salome Baylon, "Desagregación de Cargas mediante Monitoreo Energético No Intrusivo: Herramienta para la Eficiencia Energética en la Industria," 2024.
- [4] G. Bucci, F. Ciancetta, E. Fiorucci, S. Mari, and A. Fioravanti, "State of art overview of Non-Intrusive Load Monitoring applications in smart grids," *Measurement: Sensors*, vol. 18, p. 100145, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.measen.2021.100145.
- [5] P. W. Tien, S. Wei, J. Darkwa, C. Wood, and J. K. Calautit, "Machine Learning and Deep Learning Methods for Enhancing Building Energy Efficiency and Indoor Environmental Quality – A Review," Nov. 01, 2022, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.egyai.2022.100198.
- [6] S. Sohaib, I. Sarwar, M. Haseeb Iftikhar, and A. Mahmood, "A Low Cost Smart Energy Monitoring and Control System for Smart Buildings," 2016.
- [7] P. K. Dutta, S. M. El-kenawy, G. Ali, and K. Dhoska, "An Energy Consumption Monitoring and Control System in Buildings using Internet of Things," *Babylonian Journal of Internet of Things*, vol. 2023, pp. 38–47, Jun. 2023, doi: 10.58496/bjiot/2023/006.
- [8] J. Revuelta Herrero et al., "Non intrusive load monitoring (NILM): A state of the art," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer Verlag, 2017, pp. 125–138. doi: 10.1007/978-3-319-61578-3_12.
- [9] C. Ding, J. Ke, M. Levine, and N. Zhou, "Potential of artificial intelligence in reducing energy and carbon emissions of commercial buildings at scale," *Nat Commun*, vol. 15, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-50088-4.
- [10] S. Electric, "iEM3000 series Energy meters User manual," 2017. Accessed: Apr. 30, 2025. [Online]. Available: https://www.se.com/uk/en/download/document/DOC_A0005EN/
- [11] "Raspberry Pi 4 Tech Specs." Accessed: Apr. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>
- [12] "Protocolo Modbus." Accessed: Apr. 30, 2025. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Modbus>

BIOGRAFÍAS



ARMANDO JIMÉNEZ-ZAVALA Doctor en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica por el CINVESTAV Guadalajara. Especializado en el análisis de la integración de eficiencia energética, energías renovables, y monitoreo energético con herramientas de IA para el diseño de redes eléctricas inteligentes y microrredes optimizadas.



JOEL SALOME-BAYLON Profesor en el Departamento de Energías Renovables de la Universidad Tecnológica de Manzanillo, Colima. Dr. en Ingeniería Eléctrica y Maestro en Ciencias de la Electrónica. Ha desarrollado diversos proyectos de aplicación en la industria en áreas de control y automatización; con publicaciones en el área eléctrica, robótica, instrumentación, control, energías renovables y acuicultura.

Comparativa del Sombreado en Arquitecturas Fotovoltaicas con Inversores y Microinversores usando Simulink

LUIS RAMON MERCHAN VILLALBA¹, JORGE URIEL SEVILLA ROMERO², DANIEL PEÑA PEREZ³.

¹Universidad de Guanajuato

²Universidad Veracruzana

³LAPEM

lr.merchan@ugto.mx

jsevilla@uv.mx

dapenaperez@gmail.com

RESUMEN Este trabajo presenta un análisis comparativo del desempeño de sistemas fotovoltaicos ante condiciones de sombreado parcial, utilizando tanto inversores centrales como microinversores conectados a una red de distribución de bajo voltaje. A través de un modelado detallado en el entorno MATLAB/Simulink, se simulan diferentes escenarios de sombreado en arreglos fotovoltaicos, evaluando su impacto sobre la eficiencia energética, el punto de máxima potencia (MPP) y la confiabilidad del sistema. Los resultados muestran que los microinversores ofrecen una mayor tolerancia al sombreado, lo cual puede traducirse en mayores rendimientos anuales en entornos urbanos o con obstrucciones variables.

PALABRAS CLAVE — MPPT, inversor, energía solar.

I. INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las fuentes renovables más adoptadas en sistemas eléctricos distribuidos debido a su modularidad, bajo impacto ambiental y reducción progresiva de costos. Sin embargo, su eficiencia de conversión aún se ve severamente afectada por factores ambientales, siendo el sombreado parcial uno de los más perjudiciales. En entornos urbanos, donde predominan obstáculos como edificios, árboles o chimeneas, el sombreado puede ocasionar desequilibrios eléctricos entre módulos conectados en serie, con consecuencias que incluyen pérdidas por desajuste, aparición de puntos calientes (hot-spots) y activación de diodos de bypass, disminuyendo la producción energética global del sistema [1], [2].

La arquitectura de conversión de potencia en sistemas fotovoltaicos tiene un rol fundamental en la gestión de energía. Tradicionalmente, los inversores centrales se han utilizado por su bajo costo y simplicidad de control, pero presentan desventajas críticas frente al sombreado, ya que el rendimiento de toda una cadena se ve afectado por un solo módulo. En contraste, los microinversores, al operar de forma independiente en cada módulo, permiten la aplicación de seguimiento MPPT individual, optimizando la potencia incluso cuando ciertas áreas están parcialmente sombreadas. Estudios recientes demuestran que, aunque los microinversores implican un mayor costo inicial, su rendimiento anual supera al de los sistemas centralizados bajo condiciones de sombreado dinámico [3], [4].

El seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) es fundamental para maximizar la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos, especialmente en condiciones no ideales. Entre los diversos algoritmos existentes, el método Perturb and Observe (P&O) destaca por su simplicidad, bajo requerimiento computacional y capacidad de implementación en tiempo real. Sin embargo, su desempeño puede verse comprometido bajo condiciones de sombreado parcial, donde la curva de potencia del sistema puede presentar múltiples picos locales. En estas situaciones, el algoritmo P&O, diseñado para detectar un único punto de máximo, puede converger hacia un pico local subóptimo, reduciendo significativamente la eficiencia global del sistema. Esta limitación es particularmente crítica en configuraciones con inversores centrales, donde el comportamiento colectivo de los módulos sombreados arrastra el rendimiento del conjunto. No obstante, cuando se aplica P&O a microinversores con MPPT individual, el algoritmo opera sobre curvas de potencia más limpias y con menor ambigüedad, mejorando su precisión y reduciendo el riesgo de atrapamiento en máximos locales [4], [5], [6]. Por lo tanto, analizar el comportamiento del algoritmo P&O en ambos tipos de arquitectura bajo condiciones de sombreado resulta esencial para comprender su efectividad práctica y justificar posibles mejoras o adaptaciones.

MATLAB/Simulink [7] se ha convertido en una herramienta de referencia en el modelado de sistemas eléctricos y electrónicos debido a su capacidad para integrar múltiples dominios físicos, bloques funcionales detallados y controladores en tiempo discreto. Su biblioteca especializada

en sistemas eléctricos de potencia (SimpowerSystems) [8] junto con Simulink permite construir modelos precisos de módulos fotovoltaicos, convertidores DC-DC, inversores PWM y algoritmos de MPPT, lo que facilita la simulación de condiciones reales con alta fidelidad. En investigaciones recientes, se ha utilizado Simulink con éxito para reproducir y analizar el comportamiento de arquitecturas FV bajo condiciones de sombreado y evaluar estrategias de control como P&O [9], [10].

En este contexto, el presente artículo propone un modelo detallado en Simulink de dos configuraciones fotovoltaicas: una con inversor centralizado y otra con microinversores distribuidos, ambos equipados con control MPPT basado en el algoritmo P&O. Se simulan distintos escenarios de sombreado parcial, replicando condiciones reales urbanas, y se compara la potencia generada en cada caso. Los resultados obtenidos permiten cuantificar las pérdidas energéticas en configuraciones centralizadas y validar la superioridad de los microinversores en entornos de irradiancia variable. Esta investigación contribuye al diseño óptimo de microrredes solares, aportando evidencia cuantitativa para decisiones técnicas en instalaciones FV distribuidas.

II. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

El sistema propuesto para simulación está conformado por un arreglo fotovoltaico compuesto por seis módulos solares idénticos conectados en condiciones de irradiancia y temperatura controladas. Para fines de comparación, se modelan dos configuraciones distintas:

- Sistema A: inversor central que agrupa los seis paneles en un único conjunto conectado a un sistema de conversión compartido (Ver Fig. 1).
- Sistema B: arquitectura con microinversores, donde tres microinversores gestionan individualmente dos módulos cada uno, operando en paralelo (Ver Fig. 2).

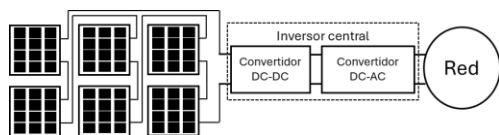


Fig. 1. Sistema A, arquitectura con inversor central.

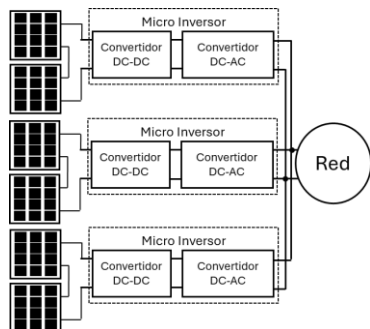


Fig. 2. Sistema B, arquitectura con micro inversores.

Esta estructura permite comparar directamente el comportamiento energético de ambas configuraciones bajo condiciones de sombreado parcial, tanto uniforme como localizado, en diferentes zonas del arreglo. La implementación de los sistemas considerados en este trabajo toma como base el ejemplo de Simulink/SimpowerSystem llamado “PV Home On-Grid Solar System” [11]. Dentro del sistema solar fotovoltaico se considera el panel LG-LG400N2W, que posee una potencia de 400 Wp [12]. La operación del panel con varios valores de irradiancia se presenta en la Fig. 3.

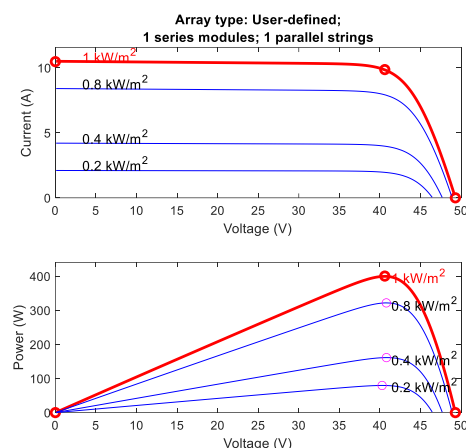


Fig. 3. Curvas P-V e I-V para el panel LG400N2W.

A. TOPOLOGÍA DE CONVERSIÓN DE POTENCIA

Los sistemas A y B comparten una arquitectura de conversión de dos etapas, tal como se muestra en la Fig. 4. La primera etapa corresponde a un convertidor DC-DC tipo boost, encargado de realizar el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). La segunda etapa corresponde a un inversor DC-AC tipo puente completo monofásico (full-bridge), encargado de inyectar la energía a una red eléctrica bajo condiciones nominales (240 V, 60 Hz).

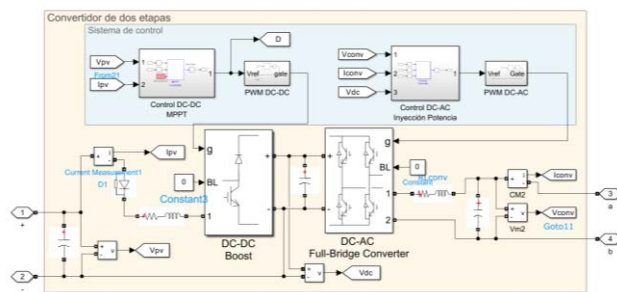


Fig. 4. Sistema de conversión de energía de dos etapas.

En el caso del sistema A, existe un único bloque de conversión que transforma la potencia de los 6 paneles combinados en una cadena de DC a AC para inyectarla a la red eléctrica. Para el sistema B, se tienen tres sistemas de

conversión, cada uno tomando la energía de 2 paneles para integrarla a la red.

B. ALGORITMO MPPT

La función de seguimiento de máxima potencia se implementa exclusivamente en el convertidor DC-DC boost, a través del algoritmo Perturb and Observe (P&O), que ajusta la referencia de tensión de salida para maximizar la potencia extraída de los módulos solares. La implementación del algoritmo se realiza mediante bloques funcionales en Simulink, y su lógica condicional sigue el flujograma mostrado en la Fig. 5.

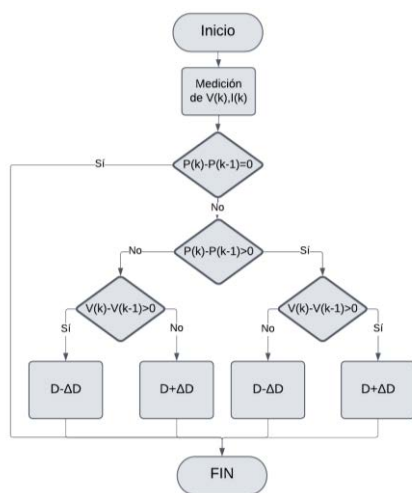


Fig. 5. Algoritmo P&O para el MPPT.

La frecuencia de perturbación y las condiciones de disparo del MPPT se ajustan dinámicamente según la velocidad de cambio de irradiancia, permitiendo observar el comportamiento del algoritmo en entornos de sombreado dinámicamente. Cabe destacar que la arquitectura con microinversores ejecuta un algoritmo MPPT por cada convertidor, lo que permite una adaptación más precisa a las condiciones individuales de cada par de paneles [13]. Otro elemento importante por mencionar es que el algoritmo implementado no garantiza una operación óptima global, cuyo caso requeriría del uso de estrategias diferentes a la presentada en este trabajo, cuyo objetivo es identificar el impacto del uso del MPPT convencional para los sistemas considerados.

C. INYECCIÓN DE POTENCIA A LA RED

Para asegurar una correcta transferencia de energía desde el sistema fotovoltaico hacia la red eléctrica, el inversor DC-AC implementa un esquema de control basado en referencias en el marco síncrono DQ, adaptado para operación con una red monofásica. Este tipo de control permite transformar las variables de tensión y corriente desde su forma sinusoidal en al dominio DQ, facilitando la regulación precisa de la potencia activa y reactiva.

El objetivo principal del control del inversor es mantener constante el voltaje del bus de corriente continua a un valor de referencia determinado, lo cual se logra mediante la inyección controlada de potencia activa hacia la red. La potencia activa generada por el arreglo fotovoltaico es transferida a la red, utilizando un lazo de control externo de potencia activa que calcula la corriente de referencia en el eje D. Esta corriente es luego utilizada como consigna en un controlador PI que regula la corriente real mediante modulación por ancho de pulso (PWM). Adicionalmente, se impone una referencia de potencia reactiva nula, es decir, $Q = 0$, con lo cual se asegura que el inversor opera en modo de factor de potencia unitario. Este criterio de operación es común en sistemas fotovoltaicos conectados a red para evitar impactos en la calidad de energía o el desbalance de tensión.

Los sistemas implementados en Simulink se presentan en la Fig. 6. La Fig. 6 (a) muestra la implementación del sistema con inversor central, donde ese tiene el arreglo de los seis paneles conectados directamente al inversor. La Fig. 6 (b) presenta un modulo de microinversor de los tres de la implementación, teniendo al sistema de conversión la conexión de 2 de los 6 paneles.

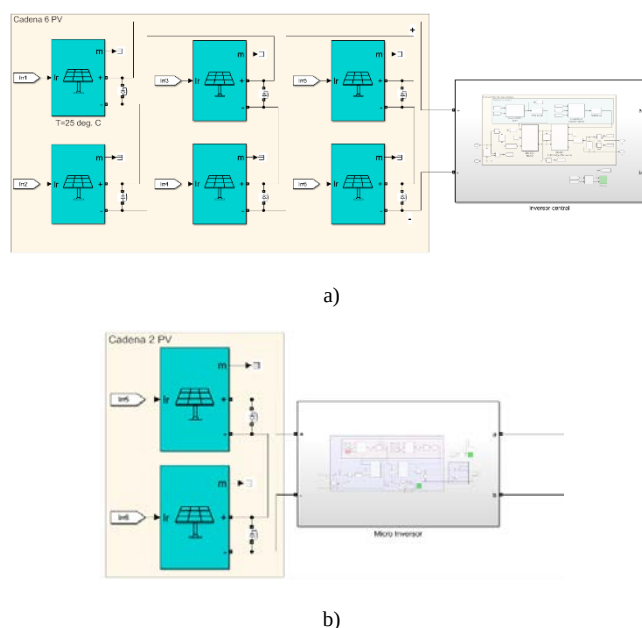


Fig. 6. Implementación en Simulink a) inversor central y b) microinversor.

Con los modelos de Simulink/SympowerSystems adaptados a las condiciones necesarias para el desarrollo de este trabajo se procede a la evaluación de la operación de los sistemas en condiciones de sombreado.

III. RESULTADOS

Para analizar el impacto del sombreado parcial en cada configuración, se diseñan tres escenarios representativos:

- **Escenario 1:** los paneles reciben valores de irradiancia de 1000 W/m².

- **Escenario 2:** los seis paneles reciben 1000 W/m², 800 W/m², 400 W/m², 1000 W/m², 900 W/m² y 200 W/m², respectivamente. Esta condición establece que los paneles reciben diversos valores de sombreado, tanto para el inversor central como para los micro inversores.
- **Escenario 3:** los seis paneles reciben 800 W/m², 800 W/m², 400 W/m², 400 W/m², 200 W/m² y 200 W/m², respectivamente. Esta condición asigna valores de irradiación sin sombreado para cada arreglo de los microinversores, pero si para el inversor central.

Los escenarios se aplican sobre el sistema en la siguiente secuencia:

1. De 0.5 s a 1 s escenario 1.
2. De 1 s a 1.5 s escenario 2.
3. De 1.5 s a 2 s escenario 1.
4. De 2 s a 2.5 s escenario 3.
5. De 2.5 s a 3 s escenario 1.

En la Fig. 7 se puede observar la irradiancia que incide sobre cada panel según el escenario descrito anteriormente.

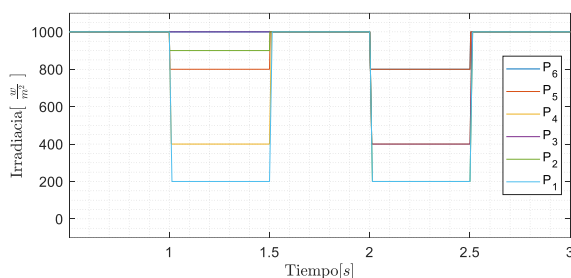


Fig. 7. Irradiancias aplicadas a los sistemas de conversión.

En la Fig. 8 se aprecian las potencias inyectadas por el inversor central y cada uno de los microinversores, notando una variación en presencia de los escenarios 2 y 3, donde los microinversores manejan diferentes valores de potencia entre ellos. Para identificar el impacto de las implementaciones, en la Fig. 9 se gráfica la potencia del inversor central y del conjunto de microinversores, además de la diferencia entre ellos. En presencia del escenario 2 se tiene que los microinversores generan 273.08 W más que el inversor central, correspondiendo al 129.8%. En presencia del escenario 3, los microinversores generan 579.6 W adicionales al inversor central, siendo un 208.62%.

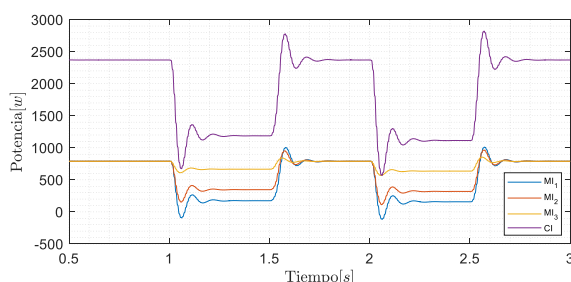


Fig. 8. Potencia de cada sistema de conversión

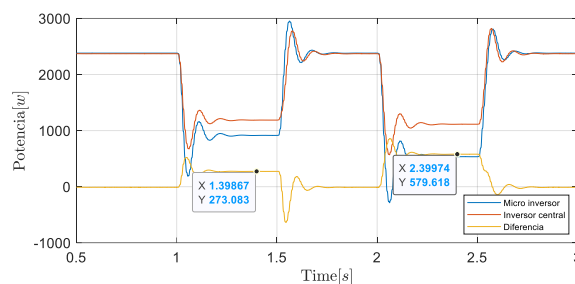
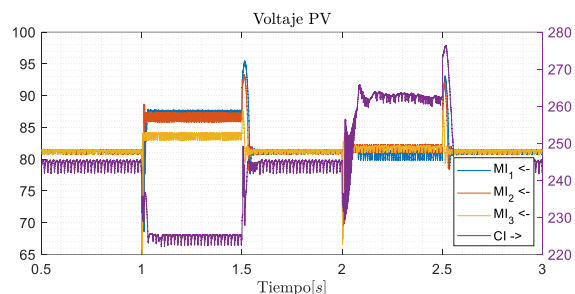
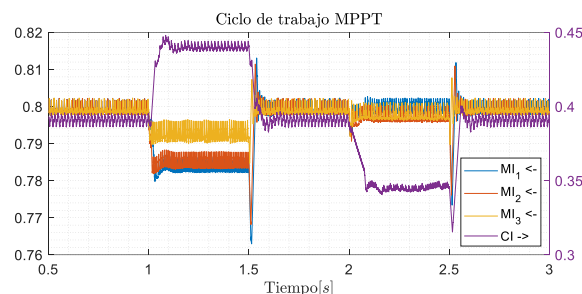


Fig. 9. Potencia de inversores central y conjunto de microinversores.

Adicionalmente la Fig. 10 (a) presenta el voltaje en los terminales de los paneles y la Fig. 10 (b) los índices de modulación generados por el MPPT. Estas Figuras denotan la operación del MPPT el cual se va ajustando en cada instante de tiempo para buscar el punto de máxima potencia.



a)



b)

Fig. 10. Voltaje en los paneles e índices de modulación del MPPT.

Finalmente, la Fig. 11 presenta el voltaje en los terminales de DC, observando que el voltaje se mantiene en 400 v, presentando pequeñas variaciones en la operación y mayores excursiones ante cambio en los escenarios de operación.

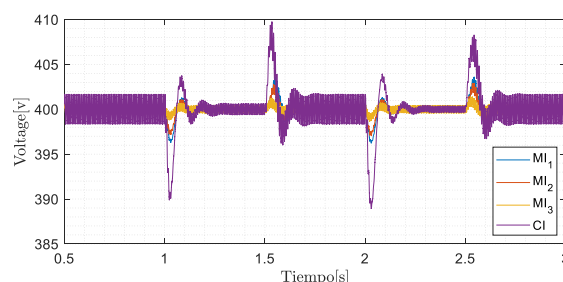


Fig. 11. Voltaje bus DC.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una comparativa en la operación de sistemas de conversión de energía solar fotovoltaica que hacen uso de inversor central y microinversores. Se presenta el modelado detallado de un sistema solar fotovoltaica adaptado de los ejemplos de la herramienta Simulink/SimpowerSystems, el cual implementa una etapa de conversión de dos etapas, una DC-DC para el MPPT y otra DC-AC para la inyección de potencia a la red eléctrica. De las pruebas realizadas se puede notar que en presencia de sombreado parcial tanto en microinversores como en el inversor central (escenario 2) el sistema con microinversores presenta una mayor generación de energía, y cuando el sombreado parcial recae sobre el inversor central y no sobre los microinversores la diferencia es aún mayor. Cabe resalta que en este trabajo no se consideraron algoritmos de búsqueda de óptimo global para el MPPT.

REFERENCIAS

- [1] I. M. Mehedi *et al.*, "Critical evaluation and review of partial shading mitigation methods for grid-connected PV system using hardware solutions: The module-level and array-level approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 146, p. 111138, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111138.
- [2] K. Sinapis *et al.*, "A comprehensive study on partial shading response of c-Si modules and yield modeling of string inverter and module level power electronics," *Solar Energy*, vol. 135, pp. 731–741, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.06.050.
- [3] S. Roy, P. Kumar Sahu, S. Jena, and A. Kumar Acharya, "Modeling and control of DC/AC converters for photovoltaic grid-tie micro-inverter application," *Mater Today Proc*, vol. 39, pp. 2027–2036, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.330.
- [4] Z. Alqaisi and Y. Mahmoud, "Comprehensive Study of Partially Shaded PV Modules With Overlapping Diodes," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 172665–172675, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2956916.
- [5] "Assessment of cross-coupling effects in PV string-integrated-converters with P&O MPPT algorithm under various partial shading patterns," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.03330.
- [6] C. Meira Amaral da Luz, E. Roberto Ribeiro, and F. Lessa Tofoli, "Analysis of the PV-to-PV architecture with a bidirectional Buck-Boost converter under shading conditions," *Solar Energy*, vol. 232, pp. 102–119, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.solener.2021.12.028.
- [7] "MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink." Accessed: Feb. 15, 2022. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/>
- [8] MathWorks, "Specialized Power Systems - Model electrical power systems using specialized components and algorithms," 2025.
- [9] X. H. Nguyen, "Matlab/Simulink Based Modeling to Study Effect of Partial Shadow on Solar Photovoltaic Array," *Environmental Systems Research*, vol. 4, no. 1, p. 20, Dec. 2015, doi: 10.1186/s40068-015-0042-1.
- [10] M. K. Al-Smadi and Y. Mahmoud, "Image-Based Differential Power Processing for Photovoltaic Microinverter," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 2, pp. 619–628, Jun. 2021, doi: 10.1109/TEC.2020.3023431.
- [11] MathWorks, "PV Home On-Grid Solar System," 2025. Accessed: Jun. 26, 2025. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/sps/ug/pv-home-on-grid-solar-system.html>
- [12] LG, "High Efficiency LG NeON® 2 72cell Module Cells: 6 x 12 Module efficiency 19.3% Connector Type: MC4." Accessed: Jun. 25, 2025. [Online]. Available: High Efficiency LG NeON® 2 72cell Module Cells: 6 x 12 Module efficiency 19.3% Connector Type: MC4
- [13] I. M. Mehedi *et al.*, "Critical evaluation and review of partial shading mitigation methods for grid-connected PV system using hardware solutions: The module-level and array-level approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 146, p. 111138, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111138.

Transición hacia la Inteligencia Artificial en Electrodomésticos: Análisis de Consumo de Energía en Refrigeradores

JESÚS MÁRTINEZ PATIÑO¹, JOSÉ MERCED LOZANO GARCÍA¹, ALEJANDRO PIZANO MARTÍNEZ¹, ROBERTO JOSE MUÑOZ MUJICA²

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica. División de Ingenierías. Campus Irapuato-Salamanca. Universidad de Guanajuato.

²Ecosistema VIDA UG. Universidad de Guanajuato

jesusmp23@ugto.mx,

jm.lozano@ugto.mx,

apizano@ugto.mx

RESUMEN. La Inteligencia Artificial está cada vez más presente en distintos equipos y dispositivos en los hogares, siendo un caso el del refrigerador; el cual se distingue por sus altos consumos de energía en comparación con la mayoría de los electrodomésticos.

A través del presente trabajo se hace una revisión de su historial de consumo energético de este electrodoméstico a lo largo de las últimas décadas, además de mostrar el cálculo de este consumo de manera anual basado en una normativa mexicana. Justo este cálculo da muestra de la gran variabilidad de diseños y características que tienen actualmente estos equipos y aún más que recientemente se les han integrado tecnológicas emergentes como el internet de las cosas y la Inteligencia Artificial.

En el caso de la Inteligencia Artificial será revisada en este trabajo en el marco de las distintas prestaciones que tiene con referencia a sus características tecnológicas; para que, se pueda realizar un comparativo en cuanto a su consumo energético con otros refrigeradores con tecnología convencional se propone un valor unitario con referencia de manera anual. Los resultados permiten identificar que los refrigeradores con Inteligencia Artificial aportan beneficios importantes en términos de interacción, conservación de alimentos y sostenibilidad, aunque su impacto en la eficiencia energética varía según el diseño del equipo.

PALABRAS CLAVE — Inteligencia artificial, refrigeradores, consumo energético.

I. INTRODUCCIÓN

El refrigerador representa un electrodoméstico importante en los hogares por la presentación de servicio que realiza, pero a la vez también representa un importante consumo de energía; esto último ha influido de manera significativa para la evolución tecnológica que ha tenido. Tal es el caso, que desde la década de los 80's se tenían consumos importantes de energía que lograron reducir hasta un 80% con la tecnología actual [1] [2]; esto se logró no solamente por el aspecto tecnológico si no a la suma también de políticas públicas, normas internacionales como los Estándares Mínimos de Desempeño Energético (Minimum Energy Performance Standards, MEPS) y programas como *Energy Star*, además de avances como los compresores con tecnología *Inverter* y la introducción de sensores y controladores inteligentes [3][4].

Para tener una referencia de un comparativo de consumo energético, generalmente se calcula el dato en *kWh/año* a partir del consumo diario multiplicado por los días del año. En el caso de México se tiene la NOM-015-ENER-2012 la

cual establece límites de consumo máximo y fórmulas específicas para distintos tipos de refrigeradores, considerando el volumen ajustado de los compartimientos y factores como temperatura ambiente y uso [5]. Estas fórmulas permiten calcular el consumo máximo permitido para distintos diseños y funciones del refrigerador, considerando también variables como la temperatura ambiente y el comportamiento térmico del refrigerador bajo diferentes cargas [6] [7].

Recientemente, la integración de la tecnología de Inteligencia Artificial (IA) ha marcado un nuevo salto tecnológico. A diferencia de los refrigeradores inteligentes basados únicamente en conectividad con tecnología de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), los que incorporan IA combinan sensores, cámaras y algoritmos de aprendizaje automático. Esto les permite a los refrigeradores tener mayores funciones de prestación de servicio y repercusión en la reducción consumo energético [8-10].

Todos estos detalles de consumo energético según las distintas funciones de prestación de servicio se verán en un

apartado más adelante, dando referencia a los refrigeradores convencionales en comparación con lo que han integrado la tecnología de IA, usado en los hogares [11] [12].

II. HISTORIAL DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN REFRIGERADORES

En la actualidad un electrodoméstico fundamental en los hogares es el refrigerador, el cual se ha identificado como un equipo que consume parte importante del consumo de energía de las casas y de los edificios residenciales. Su introducción ya tiene décadas, por lo que siempre ha ido evolucionando en su tecnología de prestación de servicio a la par de ir buscando reducir sus consumos de energía a través de la eficiencia. Desde la década de los 80's se comenzaron a identificar avances significativos en cuanto a políticas gubernamentales de eficiencia energética y la adopción de normas de carácter internacional; pues para esa época un refrigerador promedio podía consumir más de 1,000 kWh al año, transitando a su reducción a épocas actuales donde los consumos de energía eléctrica andan rondando los 350 kWh [1-4].

En la [Tabla I](#), es posible observar la evolución de consumo de energía en refrigeradores encontrados en la literatura donde se detalla la transición y la influencia de las tecnologías para ir reducción el consumo energético anual.

TABLA I. CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LAS ÚLTIMAS DÉCADAS PARA LOS REFRIGERADORES DE USO EN CASA HABITACIÓN Y EDIFICIOS RESIDENCIALES [1-4].

Década	Consumo estimado (kWh/año)	Características técnicas destacadas
1980–1989	900 – 1 100	Compresores simples, sin normas de eficiencia
1990–1999	700 – 900	Inicio de programas <i>Energy Star</i> y normas MEPS
2000–2009	400 – 700	Expansión de etiquetado energético, mejoras tecnológicas
2010–2019	250 – 450	Uso de tecnología <i>Inverter</i> , modelos Clase A en muchos países
2020–2025	200 – 350	Alta eficiencia, sensores, control inteligente del compresor

En la parte inferior de la [Tabla I](#), se observa ya la introducción del concepto “inteligente”, pues hoy en día existen ya modelos de refrigeradores llamados: refrigeradores inteligentes; de los cuales se expondrá esta temática en párrafos más adelante [8][9].

III. CARACTERÍSTICAS DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN REFRIGERADORES

Para conocer las características del consumo de energía en refrigeradores es necesario también identificar cómo se calcula este consumo; ante ello, se expondrá en párrafos más adelante la manera de obtener el consumo de energía en el tiempo-periodo de un año expresados en kWh/año. Para tener este dato se necesita conocer el periodo de uso continuo a lo largo de ese periodo de tiempo (año) determinándose con la

Ec. (1); en donde el Consumo de Energía (CA) está dado en kWh/año y el consumo de Energía en un ciclo (E) está dado en kWh/día [13].

$$CA = E \times 365 \quad (1)$$

Al valor obtenido de la Ec. (1), se le debe de aplicar un factor de ajuste y el volumen ajustado según lo establece la Norma Oficial aquí en México (Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2012, Eficiencia Energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado) [5]. Para calcular la Energía Máxima al año (E_{MAX}) según la norma antes citada, se proporciona una tabla de datos con la formulación según se aplique para 18 distintos casos; en la [Tabla II](#), son mostradas las fórmulas para 6 distintos casos; por ejemplo, está la Ec. (2), para un *Refrigerador-congelador con deshielo parcialmente automático*. Así aplica para cada uno de los 18 casos que se muestran en la tabla de la NOM-015-ENER-2012 [5].

$$E_{MAX} = 0.31VA + 248.4 \quad (2)$$

TABLA III. LÍMITES DE CONSUMO DE ENERGÍA MÁXIMOS PARA REFRIGERADORES Y CONGELADORES PARA 6 CASOS DE LA NOM-015-ENER-2012.

Descripción del refrigerador	$E_{max} =$
Refrigerador-congelador con deshielo parcialmente automático.	$0.31VA + 248.4$
Refrigerador-congelador con deshielo automático y congelador montado lateralmente, sin despachador de hielo.	$0.17VA + 507.5$
Refrigerador-congelador con deshielo automático y congelador montado en la parte inferior, sin despachador de hielo.	$0.16VA + 459.0$
Congelador vertical con deshielo automático.	$0.44VA + 326.1$
Congelador horizontal con deshielo automático.	$0.52 VA + 211.5$
Refrigerador-congelador compacto con deshielo automático y congelador montado en la parte inferior.	$0.46VA + 367.0$

La ecuación antes citada menciona el Volumen Ajustado (VA) que esta dado en dm^3 , el cual se obtiene también con la norma mencionada anteriormente, a través de la Ec. (3)[5]; donde el Volumen del compartimiento de alimentos (V_a) y el Volumen del compartimiento del congelador (V_c) son datos que dan la norma y el Factor de Ajuste (FA) es calculado a través de la Ec. (4) [6][7].

$$VA = V_a + (V_c \times FA) \quad (3)$$

$$FA = \frac{t - t_c}{t - t_a} \quad (4)$$

A su vez, para calcular el Factor de Ajuste es necesario tener la temperatura ambiente del cuarto de pruebas (t), la temperatura de referencia del comportamiento del

congelador (t_c) y la temperatura promedio de operación del compartimiento de alimentos (t_a).

Por lo anterior, podemos concluir que para obtener el dato del consumo energía a lo largo del año de un refrigerador intervienen múltiples variables en función de condiciones tales como su volumen, temperatura y otras condiciones y prestaciones tecnológicas; por lo que, al incluir la tecnología de IA es entendible que incidirá en la modificación del consumo de energía a lo largo del año [8-10].

IV. INTEGRACION DE TECNOLOGIA DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN REFRIGERADORES

La tecnología de Internet de las Cosas (IoT), ha sido previa a la introducción de la tecnología de IA en los refrigeradores, la cual se ha basado en el equipamiento de sensores y la conexión de internet [8].

A diferencia de un refrigerador con tecnología IoT, el refrigerador con tecnología inteligente además de la integración de sensores (temperatura, humedad; por ejemplo) y cámaras internas, agrega algoritmos de aprendizaje automático para reconocer alimentos y ajustar automáticamente el funcionamiento según los hábitos de los usuarios; es decir, recopila datos y los procesa con el fin de optimizar la conservación y realizar un inventario de los alimentos, incrementar la eficiencia energética y aumentar la interacción con los usuarios a través de interfaz avanzada [9] [10].

Se han identificado en este año 2025 pocas marcas comerciales que integran esta tecnología de IA (menos de 10 marcas comerciales); pero las marcas que lo integran en sus diferentes modelos los difunden como equipos que buscan la sostenibilidad, la conveniencia en la prestación de distintos servicios y ahorro energético [10-12].

Se puede citar, en función de las referencias bibliográficas que, un refrigerador con tecnología de IA no solamente cumple la función de proporcionar frío, además es un sistema inteligente que reconoce alimentos, optimiza energía, alerta al usuario en varias funciones (fecha de caducidad, inventario, gestión de compra) mejora la interacción humano-máquina, y conjuntas actividades para sustentabilidad.

Lo que se ha identificado en los refrigeradores con IA que actualmente se encuentran en el mercado, es que los costos son superiores para un refrigerador con tecnología “convencional”, con las diferencias tecnologías y de las distintas prestaciones de servicio que ofrecen cada modelo.

V. CASO DE ESTUDIO: COMPARATIVO DE CONSUMO DE ENERGÍA

Tal y como se ha citado en los párrafos anteriores en los refrigeradores hay diferentes tecnologías con múltiples

modelos y varios tamaños (en su mayoría estandarizados); por lo que un comparativo entre ellos resulta complejo en diferentes ámbitos. Por lo que, se consideraron datos publicados en distintas referencias bibliográficas para lograr recopilar los datos de consumo de energía anual de varios tipos de refrigeradores para lograr construir la [Tabla III](#). Pero para poder acercarse a una comparación más objetiva, se ha propuesto un valor unitario; es decir, el total del consumo anual dividido en volumen (unitario), quedando valores en kWh/ft^3 . Este valor permite comparar por unidad de volumen (ft^3) el consumo de energía anual independientemente del tipo de modelo de refrigerador, el tipo de tecnología, el volumen de tamaño u otras características. Los valores de la última columna de la [Tabla III](#) permite hacer este comparativo citado en el párrafo anterior, incluyendo los tres equipos con IA. Así mismo, se obtuvo un promedio de los valores de kWh/ft^3 de los equipos con tecnología tradicional para hacer un comparativo con los consumos energéticos de los tres equipos que utilizan tecnología de IA.

TABLA IIIII. CONSUMO DE ENERGÍA AL AÑO DE REFRIGERADORES CON DISTINTAS DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS [3][9][12][13].

Refrigerador	Dimensiones	Consumo de energía al año	Unitario
	$pies^3 (ft^3)$	kWh	kWh / ft^3
Convencional			
a	11.1	313	28.20
b	11.3	385	34.07
c	10.7	378	35.33
d	11.3	364	32.21
e	9.3	325	34.95
f	10.6	324	30.57
g	13.6	363	26.69
h	14.5	400	27.59
i	14	375	26.79
j	13.6	408	30.00
k	13	352	27.08
l	12.9	355	27.52
m	14.1	440	31.21
n	13	401	30.85
ñ	13.3	355	26.69
o	15.6	430	27.56
p	15.7	407	25.92
q	16.6	396	23.86
promedio			29.28
Con tecnología de Inteligencia Artificial			
r	27	585	21.67
s	22	636	28.91
t	20.5	656	32.00

Las diferencias observadas en los valores de consumo energético unitario entre los distintos equipos permiten concluir que estas variaciones están estrechamente relacionadas con el nivel de eficiencia energética de cada uno. Es decir, los equipos que presentan un menor consumo anual han sido diseñados con tecnologías más avanzadas, como sistemas de compresores inverter, aislamiento térmico optimizado y, en algunos casos, la incorporación de algoritmos de control inteligente. Por el contrario, aquellos equipos cuyo consumo es mayor, probablemente operan con tecnologías más tradicionales y menos eficientes, lo cual incrementa su demanda energética.

Para poder observar la diferencia de los consumos de energía se construyó la Fig. 1, donde es posible observar el promedio de los equipos convencionales en comparación con los equipos con IA; por ejemplo, uno de ellos esta por encima, otro por debajo y uno muy cercano al promedio de los equipos convencionales. Así mismo, podemos observar algunos equipos con distinta tecnología a la de IA que presentan una mayor eficiencia energética; pero obviamente, menores dispositivos-acciones de prestación de servicios.

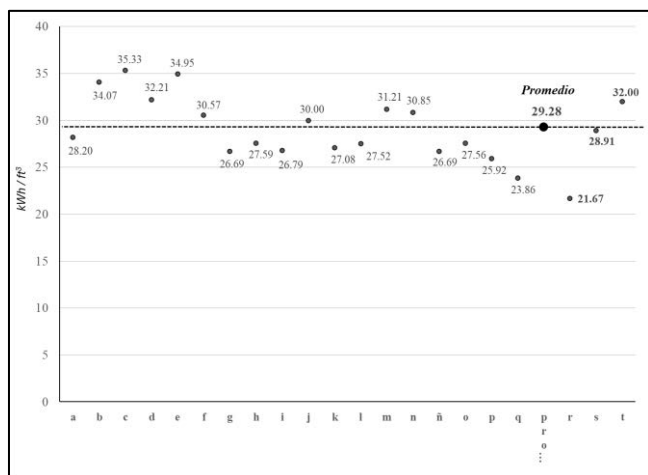


Fig. 1. Comparativo del consumo de energía anual de distintos equipos de refrigeradores dado en kWh/ft³.

VI. CONCLUSIONES

La evolución tecnológica en los refrigeradores domésticos ha ayudado a la reducción de su consumo energético, sumando también la implementación de políticas públicas y normativas como la NOM-015-ENER-2012.

En el ámbito de las tecnologías emergentes como la IA en refrigeradores representa un avance significativo, al permitir una gestión automatizada del funcionamiento mediante sensores, cámaras y algoritmos de aprendizaje. De los resultados obtenidos del análisis comparativo del consumo de energía por unidad de volumen (kWh/ft³) mostrado en este trabajo, se demuestra que no todos los refrigeradores con IA son necesariamente más eficientes energéticamente, aunque sí ofrecen mayores prestaciones de distintas funciones y conectividad. También del análisis realizado ha sido posible observar que algunos modelos con tecnología convencional mantienen un consumo más bajo por volumen, aunque con menor capacidad de servicio en comparación con los de tecnología de IA.

Se puede concluir que los refrigeradores con IA aportan beneficios importantes en términos de interacción, conservación de alimentos y sostenibilidad, aunque su impacto en la eficiencia energética varía según el diseño del equipo. Por tanto, es muy importante considerar tanto el consumo energético como las funcionalidades ofrecidas al momento de evaluar estas nuevas tecnologías.

REFERENCIAS

- [1] Vérez, D., Borri, E., & Cabeza, L. F. (2022). Trends in research on energy efficiency in appliances and correlations with energy policies. *Energies*, 15(9), 3047.
- [2] Natural Resources Canada (2015). Energy consumption of major household appliances shipped in Canada – Trends for 1990–2014. Office of Energy Efficiency. <https://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistics/aham/2015/refrigerators.cfm>
- [3] Jara, N. G., Reinoso, F. Z., Isaza-Roldán, C., & Leonardo Espinoza, J. (2017). Impactos en el consumo de energía eléctrica por el uso de refrigeradores eficientes-caso Ecuador. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (18), 53-63.
- [4] Laboratorio PROFECO. Mantén frescos tus alimentos y economía. Mayo 2018. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/332343/EC_Refrigeradores_Domesticos.pdf
- [5] Diario Oficial de la Federación. Secretaría de Energía. Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2012, Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado.
- [6] Cardoso, R. B. (2022). Influences of the ambient temperature, degradation effect and usage habits over the energy consumption of domestic refrigerators in Brazil. *Research, Society and Development*, 11(15).
- [7] Belman-Flores, J. M., Pardo-Cely, D., Gómez-Martínez, M. A., Hernández-Pérez, I., Rodríguez-Valderrama, D. A., & Heredia-Aricapa, Y. (2019). Thermal and energy evaluation of a domestic refrigerator under the influence of the thermal load. *Energies*, 12(3), 400.
- [8] Floarea, A. D., & Sgârciu, V. (2016, June). Smart refrigerator: A next generation refrigerator connected to the IoT. In 2016 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI) (pp. 1-6). IEEE.
- [9] Domotizar. (2024). ¿Cómo funciona la IA en los frigoríficos modernos?. Domotizar. <https://www.domotizar.com/como-funciona-la-ia-en-los-frigorificos-modernos/>
- [10] CienciTéc. (2024). Refrigeradora con inteligencia artificial prolonga la duración de alimentos. CienciTéc. <https://ciencittec.com/refrigeradora-con-inteligencia-artificial-prolonga-la-duracion-de-alimentos/>
- [11] Samsung Newsroom. (2025). Samsung presenta nuevos refrigeradores con innovadora tecnología AI Hybrid Cooling en CES 2025. Samsung Newsroom Latinoamérica. <https://news.samsung.com/latin/samsung-presenta-nuevos-refrigeradores-con-innovadora-tecnologia-ai-hybrid-cooling-en-ces-2025>
- [12] Revista Tour Gourmet. (2024). Refrigeradoras con inteligencia artificial ayudarían a economizar la canasta familiar. Revista Tour Gourmet. <https://revistatourgourmet.com/actualidad/refrigeradoras-con-inteligencia-artificial-ayudarian-a-economizar-la-canasta-familiar/>
- [13] Arroyo Cabanas, F. G., Ambriz Garcia, J. J., & Paredes Rubio, H. R. (2004). Experimental evaluation of the consumption of electrical energy of domestic refrigerators in Mexico; Evaluación experimental del consumo de energía eléctrica de refrigeradores domésticos en México.

BIOGRAFÍAS



JESÚS MARTÍNEZ-PATIÑO Doctorado en Energías Renovables y Eficiencia Energética (2008). Egresado del Master en Ecoeficiencia, Ahorro Energético y Ecología Industrial (2003-2004) en la Universidad de Zaragoza (España). Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato (F.I.M.E.E.) (1997-2002).

J. Martínez P. *et al.*: Transición hacia la Inteligencia Artificial en Electrodomésticos: Análisis de Consumo de Energía en Refrigeradores



JOSÉ M. LOZANO-GARCÍA recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2003, y el título de Maestro y Doctor en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2006 y 2011, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses de investigación incluyen convertidores de energía, microrredes y redes inteligente.



ALEJANDRO PIZANO MARTINEZ Recibió el título de Ingeniero Mecánico Electricista de la Universidad de Colima, Colima, México en 2001, y los grados de Maestría y Doctorado Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, en 2004 y 2010,



ROBERTO JOSÉ MUÑOZ MUJICA Doctor en Tecnología Educativa por el Centro Escolar del Mar de Cortés y Maestro en Entornos Virtuales de Aprendizaje por la Universidad de Panamá. Especialista en el campo de la educación a distancia en línea, ha desempeñado diversos roles en la Universidad de Guanajuato, tales como Jefe del Departamento de Educación a Distancia y Responsable del Sistema Universitario de Multimodalidad Educativa. Actualmente, colabora en el Ecosistema VIDA UG.

Sistema de Monitoreo y Control Agrícola con IoT: ESP8266 y Raspberry Pi 5

ZYANYA YURITZI PARRA MARTÍNEZ, IGOR GURYEV, SALVADOR PÉREZ MARTÍNEZ, GEOVANNI HERNÁNDEZ GÓMEZ, EDUARDO CABAL YEPEZ.

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Departamento de estudios Multidisciplinarios (DEM), Sede Yuriria.

zy.parramartinez@ugto.mx

guryev@ugto.mx

geov.hernandez@ugto.mx

RESUMEN En este trabajo se presenta la conectividad de un sistema de monitoreo agrícola utilizando Internet de las cosas, en el cual se logró la comunicación de los módulos mediante un punto de acceso a internet, permitiendo el intercambio de datos mediante el servidor web y el servidor de base de datos alojados en una Raspberry Pi, encargada del procesamiento de los datos enviados por el microcontrolador ESP8266 que manda peticiones al sensor DHT11 (sensor de temperatura y humedad), al sensor RGB TCS3200 (madurez del fruto) y activa o desactiva las bombas de riego. Para lograr los objetivos específicos se implementó una metodología ágil basada en Scrum la cual permitió agilizar las tareas y alcanzar los objetivos a tiempo. Los resultados de simulación del sensor DHT11 se almacenaron y se gestionaron en MySQL, los cuales se visualizan en una interfaz gráfica mostrada en el navegador mediante el servidor Apache utilizando HTML y Python, logrando así brindar al usuario una visualización de las variables en tiempo real.

PALABRAS CLAVE— ESP8266, Raspberry Pi 5, sensores, servidor, base de datos.

I. INTRODUCCIÓN

El gobierno del estado de Guanajuato [1] propuso ante el cambio climático, la demanda de alimentos y la mejora en la calidad de los alimentos, la transición de agricultura convencional a protegida y la tecnificación del campo. Con el fin de mejorar el rendimiento de las cosechas y dar un valor agregado a la cosecha priorizando el desarrollo sustentable y sostenible; es decir, aumentar la producción sin abusar de los recursos naturales al desarrollar nuevos sistemas agrícolas, técnicas y herramientas de producción. Una herramienta utilizada en la tecnificación del campo son los sistemas de agricultura de precisión.

En la agricultura de precisión se han desarrollado diversos métodos que tecnifican áreas específicas para la mejora y monitoreo de las cosechas. Algunos de los métodos más utilizados son; el rediseño en los algoritmos de procesamiento de imágenes [2], como [3] para detectar enfermedades en las hojas de los frutos, desarrollo de sistemas de hardware abierto para el control, monitoreo y procesamiento de variables de interés [4], sistemas de monitoreo satelital utilizando IoT (internet de las cosas, por sus siglas en inglés) [5], sistemas de recomendación aplicados a cosechas, sistemas de soporte de decisiones y sensores remotos [6].

El enfoque de la agricultura de precisión consta de tres etapas principales: la recolección de datos mediante satélites y sensores remotos; el análisis de esta información y la

implementación de las recomendaciones en el cultivo promueven una toma de decisiones asertivas por parte del agricultor, protegiendo así su inversión y la calidad de la cosecha. Las tecnologías clave que se emplean incluyen sistema

as de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (GIS), sensores remotos, monitores de rendimiento y maquinaria automatizada, todo ello con el fin de optimizar el uso de insumos agrícolas como agua y fertilizantes, reducir costos y minimizar el impacto ambiental [3].

A. OBJETIVO DEL SISTEMA

El sistema busca lograr una conexión efectiva entre sus módulos para monitorear las condiciones climáticas del cultivo y controlarlas bajo actuadores, que en este caso son bombas de riego y ventiladores, mediante la capacidad de procesamiento de la Raspberry Pi y el uso de servidores web y de base de datos.

II. DESARROLLO

Para la determinación de las variables se tomaron en cuenta aquellas de mayor impacto dentro del cultivo de jitomate, ya que es un cultivo de importancia para el estado de Guanajuato según el último censo agropecuario del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) [7], y también que el cambio en la variación, dentro de un rango

determinado, se puede corregir mediante actuadores. Por ello, se decidió que las variables a monitorear son la temperatura, humedad y madurez del fruto como se explica de manera explícita en la [Tabla I y II](#).

TABLA I. VARIABLES DE IMPORTANCIA

	Valores Óptimos	Afección al cultivo	Sensor utilizado
Temperatura	20°C - 25°C	Temperatura baja: debilidad en las plantas, poca fotosíntesis, retraso en la floración, maduración lenta o incompleta. Temperatura alta: frutos anaranjados con franjas verdes, aborto floral, baja formación de frutos, se marchita la planta, inhibe la germinación [8].	DHT11
Humedad	75-87%	Humedad baja: marchitez, pérdida de polen, deficiencia de calcio, restricción del crecimiento, floración irregular, rajaduras en el fruto. Humedad alta: enfermedades fúngicas y bacterianas, problemas de polinización, asfixia radicular, deficiencias nutricionales. [8]	DHT11
Madurez del fruto	Véase tabla 2 .	Ayuda a determinar la etapa óptima del fruto para su distribución de acuerdo con la distancia recorrida para llegar al punto de venta.	TCS3200

TABLA III. MADUREZ DEL FRUTO

Etapas	Descripción	Tipo de distribución
Verde	Todo verde, sin coloración rosada	Transporte largo, cosecha anticipada
Breaker	Primer indicio de color rosado en el 10% de la superficie	Exportación o larga cadena comercial
Turning	10–30% del fruto con color rosado, rojo o anaranjado	Distribución intermedia
Pink	30–60% del fruto con color final visible	Mercado fresco local
Light Red	60–90% con color rojo	Consumo cercano o venta directa
Red (Maduro)	90–100% rojo intenso	Consumo inmediato o industrialización

Fuente: [9]

El sensor DHT11 [10] es un sensor que tiene una alta precisión de medición, un amplio rango y un bajo costo. También tiene un bajo consumo de energía y una excelente estabilidad a mediano plazo. La señal digital de bus único se emite a través del pin de datos digital, lo que ahorra los recursos de E/S de la placa de control.

Por otro lado, el sensor TCS3200 [11] tiene comunicación directa con el microcontrolador, se puede programar el color y la frecuencia de salida a escala completa, se alimenta en un rango de 2.7V a 5.5V y es estable a altas temperaturas.

El cerebro de este sistema, ya que procesa los datos y aloja a los servidores web (Apache) y de base de datos (MySQL), es una Raspberry Pi 5. Las ventajas más significativas de usar una Raspberry Pi son su portabilidad, su bajo costo, automatiza procesos con un lenguaje de programación simple, tiene un acceso remoto a internet, es fácil darle soporte ya que al ser una herramienta global constantemente se desarrollan proyectos y códigos que no necesariamente son restringidos, es compatible con otros dispositivos y sistemas, también puede ser escalable sin necesidad de grandes inversiones [7].

Asimismo, ESP8266 es un microcontrolador con un módulo WiFi para el intercambio de datos de manera inalámbrica, también se puede programar para preprocesar los datos de tal manera que el envío de estos cumpla con ciertas condiciones específicas [12], por ejemplo, dar instrucciones para promediar variables y programar un *timer* para indicar los lapsos entre una lectura y otra.

La base de datos se diseñó en MySQL [13], ya que es un sistema de gestión de bases de datos relacional (RDBMS) de código abierto, basado en el lenguaje SQL (Structured Query Language). Organiza datos en tablas con relaciones entre ellas, es compatible con Windows, Linux, macOS. Gestiona y responde a consultas SQL desde otras aplicaciones (como PHP, Python, RaspberryPi), también es compatible con muchos lenguajes (Python, PHP, Java, HTML).

A. CONECTIVIDAD SENSOR-ESP8266

Para la conexión de los sensores se utilizó el pin de entrada-salida de propósito general “GPIO”. Su flexibilidad es la más adecuada para los sistemas embebidos, ya que se puede configurar en el tiempo de ejecución, es decir, que puede controlar la petición de las variables de manera que asegure un estado lógico definido cuando no hay una señal externa conectada. Las consideraciones con este pin, ya que es una placa sensible, son la protección contra voltajes excesivos (voltaje ideal 3.3V) y el debouncing, que es el rebote de contacto, puede generar cambios de estado rápidos [14].

B. COMUNICACIÓN ESP8266-RASPBERRY PI 5

Se hizo uso del protocolo WiFi con HTTP (Hypertext Transfer Protocol) sobre una conexión de una red inalámbrica, donde Wi-Fi proporciona la capa física y de enlace de datos para la transmisión de información, mientras que HTTP opera en la capa de aplicación, permitiendo la comunicación entre clientes (navegadores web, interfaz) y servidores web [15]. Para lograr la comunicación se creó un punto de acceso a internet (HotSpot) en la Raspberry Pi para el intercambio de datos. El funcionamiento del protocolo se muestra en la [Fig. 1](#), donde se explica la interacción cuando se accede a una página web desde un dispositivo.

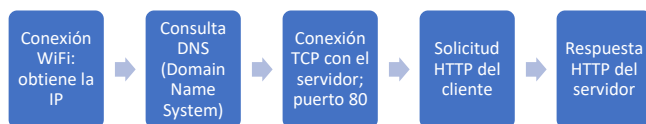


Fig. 1. Flujo del protocolo HTTP.

C. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La arquitectura del sistema se marca en el siguiente orden mostrado en la Fig. 2, donde también se muestra la interacción de los servidores alojados en Raspberry Pi.

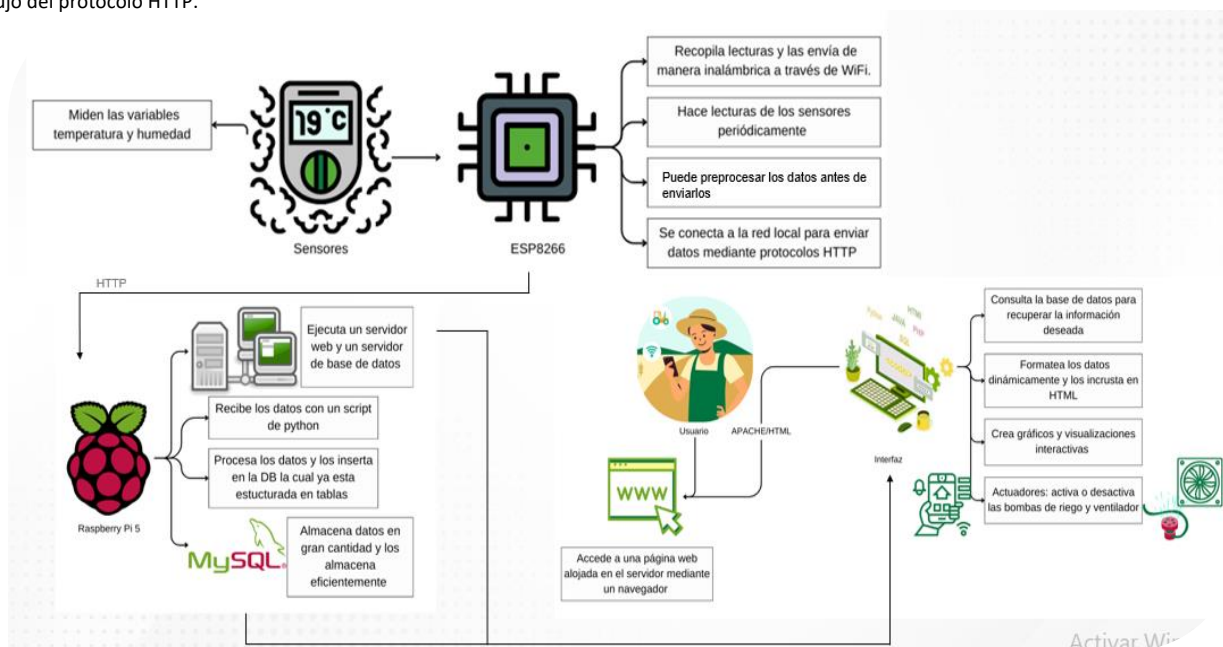


Fig. 2. Diagrama de uso del Sistema de Agricultura de Precisión.

En resumen, el cliente logra la visualización de los datos gracias a la comunicación asertiva entre los componentes del sistema que interactúan entre sí a través de protocolos y servidores específicos entre uno y otro.

D. FLUJO DE TRABAJO DEL SISTEMA DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN

1. Programación para ESP8266

El microcontrolador ESP8266, encargado de la interacción con los sensores, utiliza librerías específicas instaladas en el entorno Arduino IDE para su funcionamiento.

La librería <ESP8266WiFi.h> [16] establece conexiones TCP sobre Wi-Fi. Permite que el ESP8266 inicie la comunicación con otros dispositivos (Raspberry Pi, sensores) o servidores en la red (Apache/MySQL).

La librería <ESP8266WiFiMulti.h> simplifica la operación del ESP8266 para conectarse a la mejor red WiFi disponible y hacer las peticiones HTTP [16].

Finalmente, la librería <ESP8266WebServer.h> [16] transforma el ESP8266 en un servidor web HTTP, permitiéndole responder a peticiones de clientes (navegadores web o aplicaciones) a través de la red Wi-Fi. Se utiliza para crear interfaces de usuario básicas o para

configurar los actuadores del sistema a través de un navegador web.

El proceso de lectura y registro de variables por parte del ESP8266 implica una petición inicial de las mediciones de los sensores, como se muestra en la Fig. 3, que luego se concatenan y se almacenan directamente en la base de datos. Este proceso se realiza dentro de una condición que verifica la conexión exitosa con el sensor. Al inicio del programa, se asegura la conexión al punto de acceso Wi-Fi, realizando múltiples intentos si es necesario.

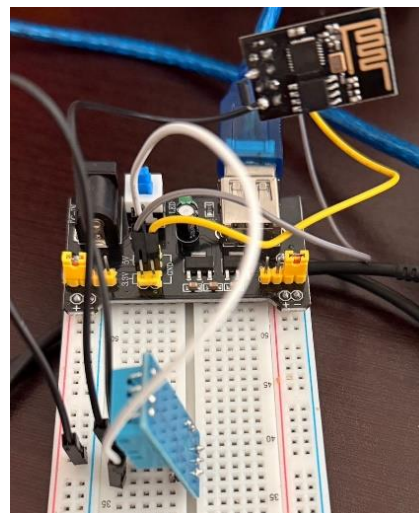
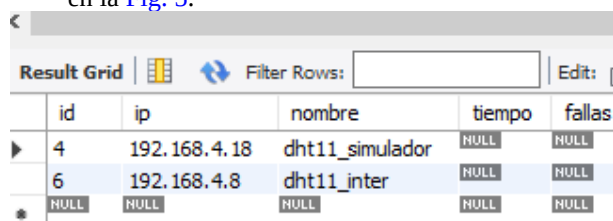


Fig. 3. Conexión del sensor al microcontrolador.

2. Configuración de la Base de Datos MySQL

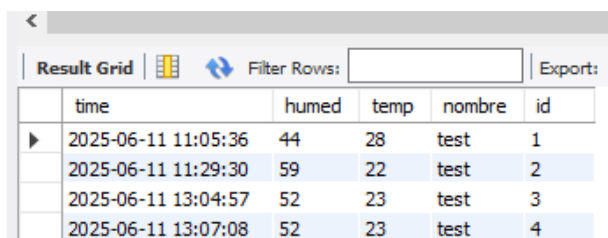
La base de datos del proyecto se aloja en una Raspberry Pi y se gestiona, supervisa y manipula mediante el protocolo SSH (Secure Shell).

- Primero, se establece una conexión SSH con el servidor utilizando la dirección IP de la Raspberry Pi.
- Se crea un esquema dedicado para alojar las tablas, llamado "Sensores".
- Finalmente, se definen las tablas necesarias, como "conexiones" (Fig. 4) para registrar cada sensor, su ip, y las fallas de conexión al sensor (para un mejor control), o también "sensDht11" para almacenar los datos del sensor DHT11, incluyendo columnas para la hora, humedad, temperatura, nombre asignado del sensor y un identificador único (id), como se muestra en la Fig. 5.



	id	ip	nombre	tiempo	fallas
▶	4	192.168.4.18	dht11_simulador	NULL	NULL
▶	6	192.168.4.8	dht11_inter	NULL	NULL
✱	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Fig. 4. Registro de conexión del microcontrolador al sensor en MySQL.



	time	humed	temp	nombre	id
▶	2025-06-11 11:05:36	44	28	test	1
▶	2025-06-11 11:29:30	59	22	test	2
▶	2025-06-11 13:04:57	52	23	test	3
▶	2025-06-11 13:07:08	52	23	test	4

Fig. 5. Almacenamiento de los datos en MySQL.

- Una vez configurada la base de datos y sus tablas, se implementa un script en la Raspberry Pi que accede a la base de datos, que almacena y consulta los datos.

3. Scripts en Raspberry Pi

En la Raspberry Pi, se han desarrollado varios scripts en Python para la gestión integral del sistema de agricultura de precisión.

Un script inicial es el encargado de realizar la petición al microcontrolador ESP8266. Este script procesa los mensajes HTTP recibidos del ESP8266 y, una vez preprocesados, los almacena exitosamente en la base de datos, insertándolos en la tabla correspondiente. Este proceso utiliza peticiones HTTP y para establecer conexión con la base de datos MySQL. En caso de error en la lectura del sensor, se notifica la falla.

4. Interfaz Web de Usuario

Para la visualización interactiva de los datos por parte del usuario, se crea otro script en la Raspberry Pi.

Este script se encarga de solicitar los últimos datos de la base de datos.

Luego, grafica la información, mostrando las variables en un formato de fácil entendimiento. En la Fig. 6, se muestra la gráfica de la temperatura (color rojo) y la humedad (color azul) a partir de los datos almacenados.

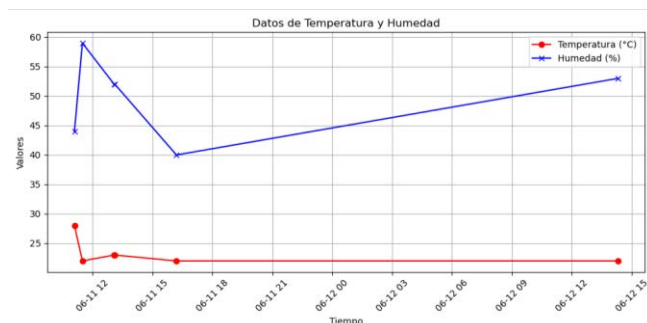


Fig. 6. Gráfica de resultados de experimentación.

Por último, se creó un script en php para llamar a la gráfica de Python y mostrarla al usuario como se muestra en la Fig. 7.

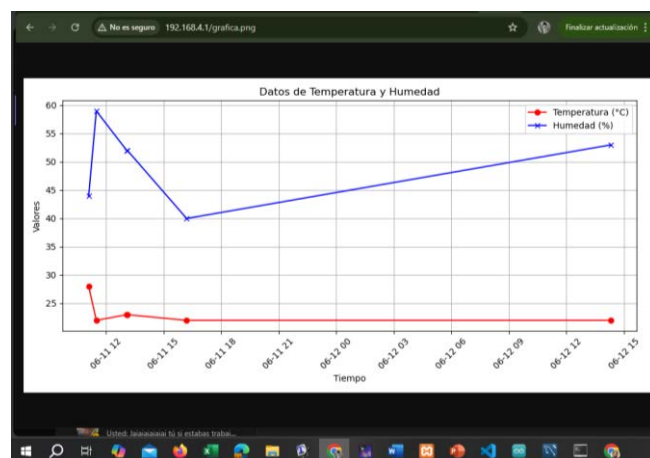


Fig. 7. Interfaz de simulación mostrada al usuario.

III. CONCLUSIONES

Se logró la implementación exitosa de un sistema de monitoreo agrícola utilizando tecnologías IoT, destacando la conectividad efectiva entre sus módulos. Se obtuvo una comunicación de los módulos a través de un punto de acceso a internet, facilitando el intercambio de datos entre el servidor web y la base de datos, ambos alojados en la Raspberry Pi 5. Mientras que Raspberry Pi es la encargada de procesar los datos enviados por el microcontrolador ESP8266, que controla el sensor DHT11 para medir temperatura y humedad, y el sensor TCS3200 para la madurez del fruto.

Como resultado, se consiguió el almacenamiento y la gestión de los datos en MySQL, los cuales son visualizados en una interfaz gráfica interactiva en el navegador web mediante el servidor Apache y scripts de Python. La cobertura máxima de comunicación entre el microcontrolador y el servidor es ≤ 10 metros, dependiendo la interferencia del HotsPot. Lo cual es un área de oportunidad para futuras investigaciones relacionadas al hardware implementado.

Sin embargo, la arquitectura modular y el uso de componentes de hardware abierto como ESP8266 y Raspberry Pi 5, junto con software de código abierto como MySQL, Apache y Python, brindan escalabilidad y flexibilidad para futuras mejoras.

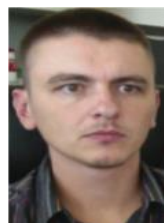
IV. REFERENCIAS

- [1] INCyTU, "Agricultura de precisión," FCCyT, Ciudad de México, México, 2018.
- [2] L. Wenbo, B. Chenhao, T. Wei, X. Yu y K. Jie, "A Lightweight Real-Time Recognition Algorithm for Tomato Leaf Disease Based on Improved YOLOv8," *Agriculture*, vol. 14, no. 2069, p. 19, 2024.
- [3] L. Yong-Suk, P. M. Prakash, K. J. Gyu, C. S. Seok, S. Y. Bae y K. Gun-Do, "Improved Tomato Leaf Disease Recognition Based on the YOLOv5m with Various Soft Attention Module Combinations," *Agriculture*, vol. 14, no. 1472, p. 18, 2024.
- [4] D. C. García, S. Álvarez Martínez y M. Espinoza García, "Raspberry Pi y Arduino: semilleros en innovación tecnológica para la agricultura de precisión," *Rev. Tecnol. Inform. Telecomun. Inform. Sist.*, vol. 2, no. 1, pp. 74–82, 2018.
- [5] J. Guerrero-Ibañez et al., "SGreenH-IoT: Plataforma IoT para Agricultura de Precisión," *Sist., Cibernética e Informática*, vol. 14, no. 2, p. 6, 2017.
- [6] Ó. A. Orozco y G. Llano Ramírez, "Sistemas de información enfocados en tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar: una revisión," *Rev. Ingenierías Univ. Medellín*, vol. 15, no. 28, 2015.
- [7] INEGI, "Resultados definitivos del Censo Agropecuario 2022 en el estado de Guanajuato," INEGI, Guanajuato, 2023.
- [8] V. Estrada-Trejo et al., "Diversidad de poblaciones nativas de jitomate para germinación en condiciones salinas," *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, vol. 5, no. 6, p. 9, 2014.
- [9] U.S. Department of Agriculture, "United Standards for Grades of Fresh Tomatoes," USDA Agricultural Marketing Service, Washington, D.C., 1997. [En línea]. Disponible en: <https://www.ams.usda.gov/grades-standards/tomato-grades-and-standards>. [Accedido: 23-may-2025].
- [10] AG Electrónica, "Sensor de temperatura y humedad DHT11," 07-nov-2022. [En línea]. Disponible en: <https://agelectronica.lat/pdfs/textos/1/101020011.PDF>. [Accedido: 22-may-2025].
- [11] TAOS, "TCS3200, TCS3210 Programmable Color Light-to-Frequency Converter," jul. 2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.mouser.com/catalog/specsheets/tcs3200-e11.pdf>. [Accedido: 22-may-2025].
- [12] A. Panicker, D. Gupta, H. Deora y N. Gupta, "Real Time Environmental Factors Monitoring System by Sensor Fusion on a NodeMCU ESP8266-Wemos-D1 R1 Board," en *Proc. Int. Conf. Smart Syst. Adv. Comput.*, 2023, pp. 1–6.
- [13] MySQL, "MySQL 5.0 Reference Manual," 24-may-2011. [En línea]. Disponible en: <https://downloads.mysql.com/docs/refman-5.0-es.a4.pdf>. [Accedido: 28-may-2025].
- [14] A. Pérez Bautista, "Manipulación de los pines GPIO de la tarjeta Raspberry Pi empleando el lenguaje C mediante el entorno de desarrollo Code::Blocks," *Bol. UPIITA: El camino de la innovación educativa*, vol. 51, 2015.
- [15] Geeks for Geeks, "HTTP Full Form - Hypertext Transfer Protocol," 08-abr-2025. [En línea]. Disponible en:

<https://www.geeksforgeeks.org/http-full-form/>. [Accedido: 28-may-2025].

- [16] SparkFun Electronics, "ESP8266 Thing Hookup Guide," [En línea]. Disponible en: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/esp8266-thing-hookup-guide/all>. [Accedido: 22-may-2025].

V. BIOGRAFÍAS



IGOR GURIEV Ingeniero Electrónico por la Universidad Nacional de Jarkiv (2004), Maestro en Láseres y técnicas optoelectrónicas (2005) y Doctor en ciencias fisicomatemáticas con especialidad en Óptica y Física de Láseres (2010). Actualmente, es profesor del Departamento de Estudios Multidisciplinarios de la Universidad de Guanajuato desde 2010. Ha publicado un libro en la editorial Springer, seis capítulos de libro en varias editoriales internacionales y más de veinte artículos en revistas internacionales. Asesor y co-asesor de 18 tesis de nivel maestría. Ha terminado varios proyectos relacionados a modelado de microestructuras ópticas. Ha asesorado más de 10 proyectos de estudiantes relacionados al área de domótica, visión por computadora y procesamiento de imágenes.



GEOVANNI HERNÁNDEZ GÓMEZ Estudió su Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de Celaya realizando su trabajo de grado basado en la administración de Sistemas Operativos UNIX. Posteriormente, realizó su Maestría en Ingeniería Eléctrica (opción instrumentación) en la Universidad de Guanajuato División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca iniciando su investigación en el análisis y procesamiento de imágenes outdoor para navegación robótica y visión humana. Así mismo, realizó su doctorado en el Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. en conjunto con la Universidad de Murcia España en su Laboratorio de Óptica (LOUM). En el 2015 trabajó como profesor invitado en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Unidad Azcapotzalco en el laboratorio de sistemas complejos. Actualmente es profesor investigador del Departamento de Estudios Multidisciplinarios sede Yuriria de la Universidad de Guanajuato y es el director ejecutivo del UG INNOVA Tecnoparque. Su área de investigación se basa en la Instrumentación aplicada en óptica fisiológica desarrollando sistemas informáticos y aplicaciones para la adquisición y manejo de datos.



EDUARDO CABAL YÉPEZ Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, con Maestría en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Guanajuato y obtuvo su grado de doctor en la Universidad de Sussex en el Reino Unido. Desde 2008 se unió a la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, como profesor investigador en el Departamento de Estudios Multidisciplinarios. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), con el nombramiento de investigador nacional Nivel 2. Ha participado como autor/coautor de más de 90 artículos de investigación publicados en revistas de alto factor de impacto, registradas en el Journal Citation Report (JCR) y memorias de congresos internacionales. Sus áreas de interés son instrumentación digital, procesamiento digital de imágenes y señales, inteligencia artificial, robótica, sensores inteligentes, procesamiento en tiempo real, mecatrónica, FPGAs, calidad de la energía y sistemas embebidos, entre otras. Actualmente, funge como editor de área para procesamiento de señales y electrónica de potencia en la revista científica internacional *Computers and Electrical Engineering* de la editorial Elsevier y como editor asociado para las revistas científicas internacionales *Digital Signal Processing* de la editorial Elsevier e *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.



ZYANYA YURITZI PARRA MARTINEZ Estudió Ingeniería en Biotecnología en Universidad Tecnológica de Morelia (2022), se tituló con un proyecto de investigación sobre productos a base de la cepa *Trichoderma Harzianum*. Posteriormente trabajó como docente en el CECyTe Guanajuato Plantel Yuriria, impartiendo las clases de bioquímica, biología moderna y ecología. Posteriormente ingresó a la Maestría en

Administración de Tecnologías en la Universidad de Guanajuato División de Ingenierías campus Irapuato-Salamanca Cede Yuriria, donde actualmente se encuentra desarrollando su tesis basada en Sistemas de Agricultura de Precisión. Ha participado en algunos congresos del área informática.



SALVADOR PÉREZ MARTÍNEZ Ingeniero mecatrónico egresado de la división de ingenierías de la universidad de Guanajuato campus Irapuato-Salamanca, actualmente estudiante de la maestría en administración de tecnologías en el departamento de estudios multidisciplinarios de la universidad de Guanajuato y miembro activo del Bee Software Laboratory (BSL).

Simulación del Proceso de Automatización de Presión con Balanza de Pesos Muertos

SAMUEL ORTEGA CANO, JOSÉ JUAN ALFARO RODRIGUEZ, JOSÉ MIGUEL SOSA ZÚÑIGA

Tecnológico Nacional de México/ ITS de Irapuato
mip23110016@irapuato.tecnm.mx
jose.ar@irapuato.tecnm.mx
jose.sz@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN La medición de la presión, utilizada en el ámbito de la salud y en diversas industrias como la eléctrica y la automotriz, requiere patrones de referencia eficaces y precisos. Para llevar a cabo estas mediciones, se utilizan instrumentos confiables y procedimientos alineados con normativas vigentes. Este artículo presenta la simulación de un sistema de lazo cerrado para la regulación de la presión para la calibración automatizada de instrumentos de presión, utilizando como patrón una balanza de pesos muertos. Se obtiene un modelo matemático del sistema y se evalúa mediante simulaciones numéricas implementando tres tipos de controladores: proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral (PI) y proporcional-integral-derivativo (PID). Cada controlador se evalúa mediante MATLAB/Simulink, utilizando señales dinámicas que replican condiciones reales de operación.

PALABRAS CLAVE — Controlador PID, Balanza de presión, Sistema de control, Regulación de presión.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la medición y control de la presión en la industria han evolucionado debido a la incorporación de tecnologías más precisas y confiables, así como mejoras en los procedimientos de calibración [1]. La creciente exigencia de precisión y exactitud en esta variable resulta primordial para la seguridad del ser humano. Por ejemplo, en la industria automotriz [2], [3] se busca optimizar la medición y control de la presión en frenos electrohidráulicos automotrices, combinando calibraciones precisas de sensores con métodos de regulación avanzada para mayor estabilidad y seguridad.

Estas exigencias han impulsado la creación de patrones de mayor exactitud y de métodos de calibración más eficientes. La calibración se ha consolidado como un aspecto crucial en instrumentación y aplicaciones industriales [1]. Uno de los procesos de calibración más confiables es la utilización de la balanza de presión como patrón de referencia, instrumento de alta exactitud y estabilidad fundamentado en el principio de equilibrio de fuerzas.

Los patrones de presión actuales han evolucionado con el uso de balanzas de alta exactitud; sin embargo, en muchos casos, el proceso de calibración no está automatizado. Una solución a este problema es utilizar un sistema de control que automatice los procesos empleando controladores, actuadores y sensores, tal como se muestra en [4]. En el sistema de control, se pueden utilizar algoritmos, entre los que destacan el control clásico, control adaptativo y control digital avanzado [5].

El presente trabajo se enfoca en la evaluación mediante simulaciones del sistema de control de presión utilizando tres configuraciones clásicas de control: proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral (PI) y proporcional-integral-derivativo (PID), evaluando su desempeño ante señales dinámicas que simulan condiciones reales de calibración para determinar cuál de ellos ofrece mejor estabilidad y respuesta.

II. DESARROLLO

A. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

La calibración de equipos de medición de presión es un proceso que consiste en conectar dos equipos, el instrumento bajo calibración (IBC) y el equipo patrón a una fuente de alimentación neumática y aplicar una serie de presiones conocidas, comparando las mediciones obtenidas. Dicho proceso se puede dividir en varias etapas, que van desde la preparación de los equipos hasta la generación del certificado final. Donde cada etapa tiene como objetivo garantizar que las mediciones realizadas sean fiables, consistentes y trazables a patrones nacionales e internacionales [6].

El sistema de calibración de presión automatizado propuesto, tiene como objetivo alcanzar las presiones de referencia mediante la balanza de pesos muertos o balanzas de alta exactitud. Este tipo de balanza genera presión al aplicar masas calibradas sobre un pistón de área conocida. Cuando la presión ejercida por el sistema es igual a la generada por las masas aplicadas, el pistón alcanza una condición de flotación estable, comúnmente conocida como punto de equilibrio. Dicho punto al ser alcanzado nos permite validar un punto de calibración [7].

Tradicionalmente, este equilibrio se ha regulado de forma manual mediante válvulas y observación visual, lo que conlleva a generar errores y aumentar la duración del proceso. Para resolver este problema, se implementa un sistema de control en lazo cerrado que regula la presión neumática de forma continua, compensando perturbaciones.

En la Fig. 1 se describe el sistema propuesto, el cual se compone por un controlador de presión, sensores de temperatura, humedad y presión atmosférica, así como un controlador encargado del procesamiento y la ejecución del algoritmo de control. A partir de este conjunto, se modela la dinámica de la planta y las estrategias de control para simular su comportamiento bajo diferentes condiciones.

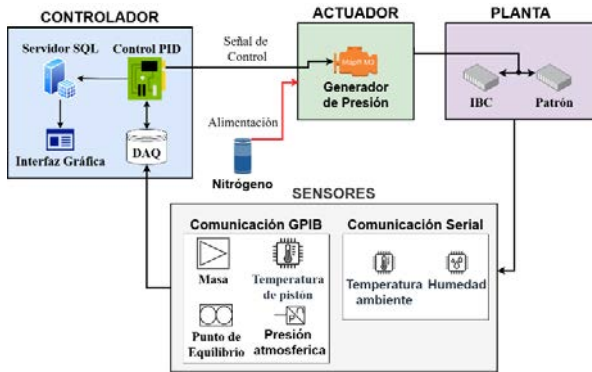


Fig. 1. Diagrama del sistema de control propuesto.

B. BALANZA DE PRESIÓN

La balanza de presión, también conocida como balanza de pesos muertos, es un instrumento patrón primario cuyo principio de funcionamiento se basa en el equilibrio entre la fuerza ejercida por las masas y la fuerza resultante de la presión del gas aplicado al pistón.

Cuando el conjunto pistón-cilindro se encuentra en equilibrio estático, la fuerza de presión F_p ejercida por el fluido (nitrógeno) es igual a la fuerza gravitacional efectiva aplicada por las masas. Dicho equilibrio en la práctica debe de considerar la corrección de factores ambientales [7]. Esta condición genera un punto de flotación del pistón, el cual indica que la presión generada es estable y puede ser usada como valor de referencia para la calibración [8].

El modelo matemático completo de la balanza está definido por la ecuación de presión presentada en [8], que integra múltiples factores de corrección. La Ec. (1), expresada en función de las masas, propiedades físicas del pistón y condiciones ambientales, se describe como:

$$P = \frac{\sum_i M_i g_l (1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}) + \pi D \tau}{A_o [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(T - T_r)](1 + \lambda P)} - \rho_r g_l h \quad (1)$$

Donde:

M_i : masa individual aplicada.
 g_l : aceleración de la gravedad local.
 ρ_a : densidad del aire.

ρ_m : densidad del material de las masas.

D : diámetro del pistón.

τ : tensión superficial.

A_o : área efectiva del pistón a condiciones de referencia.

T : temperatura a la que opera el sistema.

T_r : temperatura de referencia.

λ : coeficiente de compresibilidad.

ρ_r : la densidad del fluido.

h : la corrección por nivel hidrostático.

Esta expresión permite calcular con alta exactitud el valor de presión generado en función de las condiciones ambientales y de las propiedades físicas del sistema. Para fines de control, se considera que muchas de estas variables son constantes o compensadas, permitiendo una simplificación del modelo.

C. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

A partir de Ec. (1) y bajo condiciones de operación controladas, se pueden realizar ciertas simplificaciones que permiten construir un modelo del sistema para el análisis y el diseño de los controladores. Se considera que:

- Las condiciones ambientales de temperatura, presión atmosférica y humedad presentan variaciones lentas, por lo que sus efectos se consideran constantes durante intervalos cortos [9].
- La densidad del material (masas), diámetro y área específica son constantes, debido a que el pistón no puede cambiar en medio de un proceso de calibración.
- La corrección hidrostática se anula al ubicar los niveles de referencia en la misma altura.

Con estas condiciones, se define un modelo basado en la segunda ley de Newton, donde la fuerza entre la presión aplicada y el peso efectivo determina la aceleración del pistón. El modelo se determina como:

$$m\ddot{y} = -mg \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) + A_o(1 + \alpha_{cp}(T_p - T_r))p \quad (2)$$

Donde:

y : posición vertical del pistón.

m : masa total aplicada.

p : presión neumática aplicada al pistón.

A_o : área efectiva del pistón.

α_{cp} : coeficiente térmico conjunto pistón-cilindro.

T_p, T_r : temperatura actual y de referencia.

ρ_a, ρ_m : densidades del aire y del material.

Al considerar que:

$$x_1 = y, \quad x_2 = \dot{y} \quad (3)$$

Y sustituyendo en Ec. (2), se obtiene el modelo en espacio de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) + \frac{A_o}{m} (1 + \alpha_{cp}(T_p - T_r)) p \end{aligned} \quad (4)$$

Al linealizar el sistema alrededor del punto de equilibrio, se determina un cambio de variables considerando que:

$$\mathbf{z}_1 = \mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1, \mathbf{z}_2 = \mathbf{x}_2 - \hat{\mathbf{x}}_2, \mathbf{w} = \mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}} \quad (5)$$

Donde $\hat{x}_1$, $\hat{x}_2$ y $\hat{p}$ representan los valores de equilibrio del sistema. Las variables z_1 , z_2 y w corresponden a las desviaciones respecto a dichos puntos de equilibrio. Con estos cambios, el modelo se convierte en un sistema lineal de segundo orden:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{z}}_1 &= \mathbf{z}_2 \\ \dot{\mathbf{z}}_2 &= \mathbf{a} \cdot \mathbf{w}\end{aligned}\quad (6)$$

Donde $a = \frac{A_o}{m}(1 + \alpha_{cp}(T_p - T_r))$ es una constante positiva que agrupa los parámetros del sistema. La función de transferencia entre la entrada $w(s)$ y la salida $z_1(s)$ es:

$$\mathbf{G}(s) = \frac{a}{s^2} \quad (7)$$

Este modelo representa una planta con dos polos en el origen, siendo así un sistema inestable. Por lo tanto, es necesario el diseño de un controlador que permita estabilizar el sistema.

D. IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES

Con el modelo de la planta definido por $G(s) = \frac{a}{s^2}$, se implementaron tres estrategias de control en lazo cerrado: PD, PI y PID [10]. Para cada controlador se diseñó un diagrama de bloques con retroalimentación, donde los parámetros se obtuvieron mediante pruebas sucesivas para optimizar el rendimiento bajo condiciones reales simuladas.

Antes de implementar los controladores, se integra la dinámica del actuador al modelo. El actuador neumático (compresor) que regula la presión tiene un comportamiento de primer orden, definido en la siguiente función de transferencia:

$$G_{act}(s) = \frac{1}{t_f s + 1} \quad (8)$$

Donde t_f es el retardo del actuador.

Esta función se coloca en cascada a la planta, modificando la función de transferencia total del sistema como:

$$G_{total}(s) = \frac{a}{s^2(t_f s + 1)} \quad (9)$$

El controlador se conecta en la retroalimentación del lazo cerrado En la Fig. 2 se muestra el diagrama de bloques del sistema completo con controlador PID, planta y actuador propuesto.

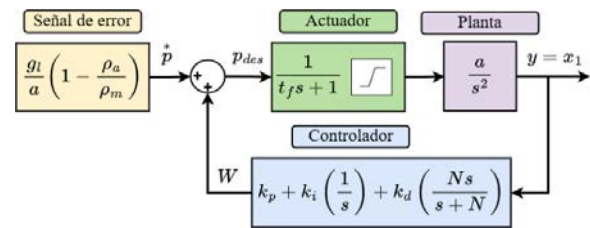


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado.

1. Controlador pd.

El controlador PD introduce un término proporcional que incrementa el error actual y uno derivativo que reduce el sobre impulso. Además, se incluye un filtro en el término derivativo para reducir el efecto del ruido:

$$C_{PD}(s) = k_p + \frac{k_d N s}{s + N} \quad (10)$$

La función de transferencia del sistema en lazo cerrado se obtiene como:

$$T_{PD}(s) = \frac{a(s+N)}{s^2(t_f+1)(s+N)-ak_p(s+N)-ak_dNs} \quad (11)$$

La obtención de polos y ceros muestra que todos los polos están en el semiplano izquierdo, garantizando estabilidad.

2. Controlador PI.

El controlador PI introduce un término integral que elimina el error estacionario y un término proporcional que mejora la respuesta transitoria:

$$C_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (12)$$

La función de transferencia del sistema en lazo cerrado se obtiene como:

$$T_{PI}(s) = \frac{as}{t_f s^4 + s^3 - ak_p s - ak_i} \quad (13)$$

Este controlador genera polos complejos con parte real positiva, lo que conduce a inestabilidad y oscilaciones crecientes.

3. Controlador PID.

El controlador PID es la combinación de los otros dos controladores, incorporando los tres términos:

$$C_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d N s}{s+N} \quad (14)$$

La función de transferencia de la planta controlada es:

$$T_{PID} = \frac{as(s+N)}{s^3(t_f s+1)(s+N)-ak_n s(s+N)-ak_d N s(t_f s+1)-ak_i (s+N)} \quad (15)$$

Este controlador desplaza los polos de la planta original hacia el semiplano negativo, garantizando la estabilidad.

E. COMPARACIÓN DE CONTROLADORES

Para evaluar el desempeño de cada controlador, se analizó la respuesta del sistema ante una entrada tipo escalón unitario.

En la Fig. 3 se muestra la respuesta del controlador PI, como se puede observar dicho controlador resulta ser inestable, presentando oscilaciones crecientes debido a polos en el semiplano derecho. La planta, con dos polos en el origen, es inherentemente inestable, y el término integral del PI añade un polo adicional en el origen. Esto provoca que, aunque un cero con parte real negativa desplaza uno de los polos hacia la región estable, los otros dos polos se ubiquen en el semiplano inestable, generando oscilaciones crecientes. Para mejorar su desempeño, el controlador PI puede combinarse con técnicas que añadan amortiguamiento, como en un controlador PID, o emplear controladores más avanzados.

En la Fig. 4. se presenta la respuesta del controlador PD, en ella se observa que el controlador PD logra estabilizar la planta y eliminar el error en estado permanente, sufriendo el punto de equilibrio un desplazamiento. En la Fig. 5. Se aprecia la respuesta del controlador PID a una señal escalón unitario, donde se observa que dicho controlador es estable, elimina el error y el punto de equilibrio no presenta desplazamiento.

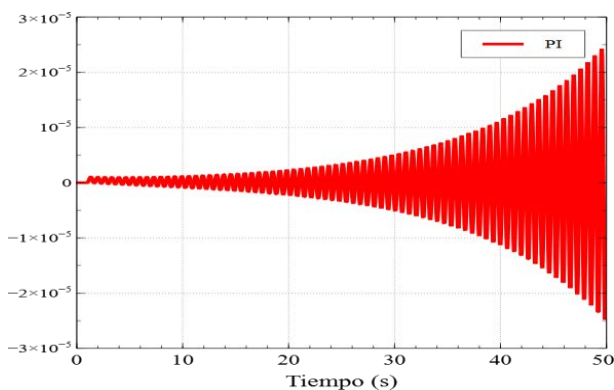


Fig. 3. Respuesta del sistema con escalón unitario y controlador PI.

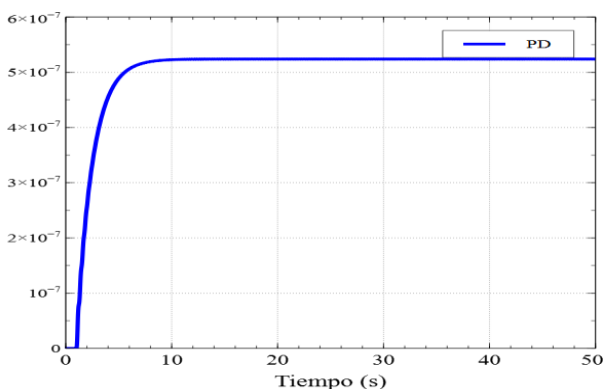


Fig. 4. Respuesta del sistema con escalón unitario y controlador PD.

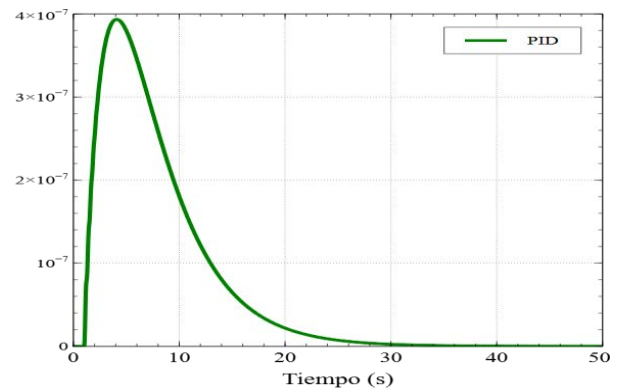


Fig. 5. Respuesta del sistema con escalón unitario y controlador PID.

Además de las respuestas de los controladores al escalón unitario, se emplearon tres métricas estándar: tiempo de subida (t_r), sobreimpulso (M_p) y tiempo de asentamiento (t_s). Los resultados del desempeño se muestran en la Tabla I.

TABLA I. DESEMPEÑO PARA CADA CONTROLADOR.

Controlador	t_r (s)	M_p (%)	t_s (s)
PD	2.97	5.2	7
PI	0.95	100	∞
PID	0.89	40	4.1

Tanto el PD como el PID logran estabilizar la planta y eliminar el error en estado permanente. Sin embargo, el controlador PID es el único que permite mantener el punto de equilibrio del sistema en su posición original, permitiendo una salida constante sin desplazamiento del equilibrio.

F. SIMULACIÓN CON SEÑALES DINÁMICAS

Para determinar la respuesta del sistema, utilizando un controlador PID se realizaron simulaciones con señales dinámicas que representan el proceso de calibración. Estas señales abarcan variaciones en la presión deseada (p), la presión atmosférica (p_a), la temperatura del pistón (T_p), la temperatura ambiente (T_a) y la humedad relativa (HR), las cuales afectan directamente a la constante del sistema a y la densidad del aire ρ_a .

La señal de presión deseada es una rampa escalonada que varía desde un valor mínimo a un máximo con incrementos de 10 %. Cada cambio de presión fue acompañado por variaciones en los parámetros ambientales para simular condiciones cercanas a la operación real. Las señales de entrada utilizadas se presentan en la Tabla II.

TABLA II. VALORES DE LAS SEÑALES DE ENTRADA USADOS EN LA SIMULACIÓN.

Tiempo (s)	P (Pa)	p_a (Pa)	T_p (K)	T_a (K)	HR (%)
0-70	206,842	83,410	293.24	292.85	31.4
70-140	689,474	82,980	293.29	293.05	32.1
140-210	1,241,054	82,988	293.30	292.95	32.1
210-280	1,654,739	82,996	293.32	292.95	31.7
280-350	2,068,423	82,996	293.34	292.95	31.4
350-420	2,482,108	82,988	293.43	293.15	32.0
420-490	2,895,793	82,988	293.46	293.15	32.1
490-560	3,309,478	82,990	293.46	293.15	32.1
560-630	3,723,162	82,990	293.48	293.15	32.1

En la Fig. 6 se presenta la señal de entrada de presión, la cual actúa como señal de referencia, e incrementa en escalones definidos, de acuerdo con los valores descritos en la Tabla II. En la Fig. 7 se presenta la señal de salida generada por el controlador PID. Se puede observar una respuesta con oscilaciones ante cada cambio de presión, mostrando la corrección del controlador frente a los errores de presión. En la Fig. 8 se muestra la presión de desfase o señal de desplazamiento que equivale a la suma de las dos anteriores señales, esta señal constituye la entrada del actuador. La Fig. 9 presenta la señal de salida del actuador, donde se observan picos que indican la activación del actuador en respuesta a los cambios de presión requeridos. La magnitud y forma indican el esfuerzo del sistema para alcanzar las presiones requeridas. Finalmente, en la Fig. 10 se presenta la salida del sistema, que representa el punto de equilibrio alcanzado en cada cambio de presión. Se observa como el sistema responde con sobreimpulso a cada cambio en la señal, logrando estabilizarse en el punto de equilibrio original.

Los resultados muestran que el controlador PID mantiene el punto de equilibrio en su posición incluso ante variaciones combinadas de presión y condiciones ambientales. El sistema presenta respuesta subamortiguada, con sobreimpulso.

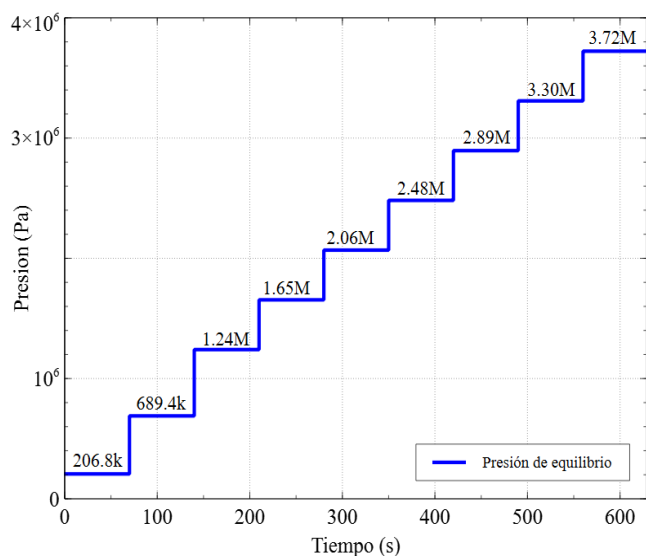


Fig. 6. Señal de presión de entrada utilizada como referencia.

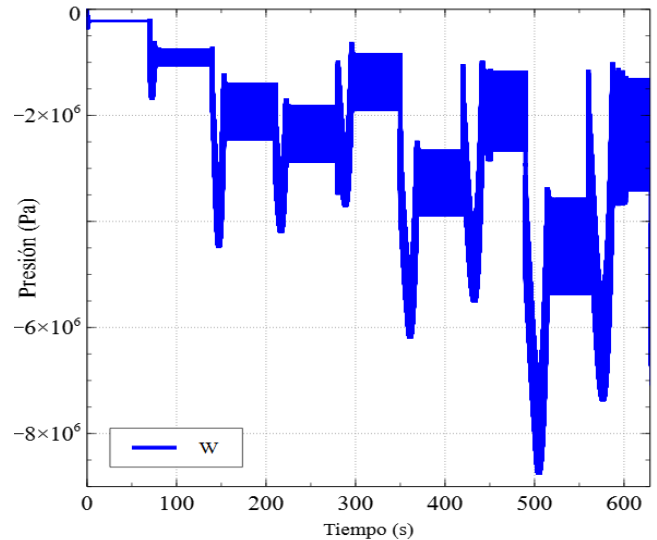


Fig. 7. Señal de control $w(t)$ generada por el controlador PID.

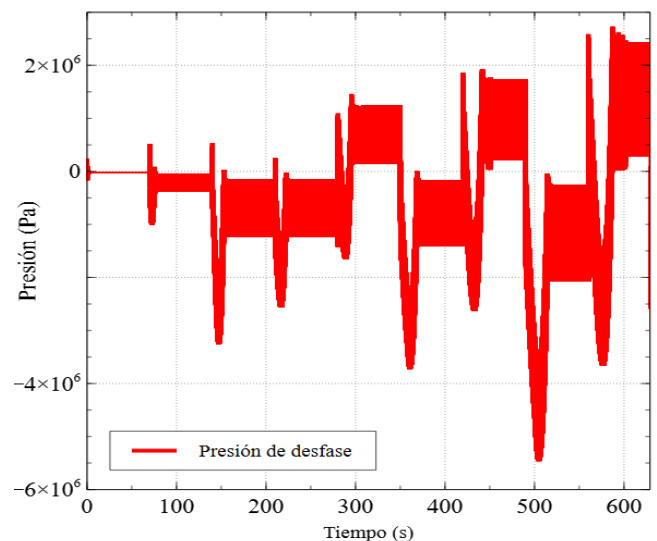


Fig. 8. Señal de presión de desfase entre la referencia y la salida.

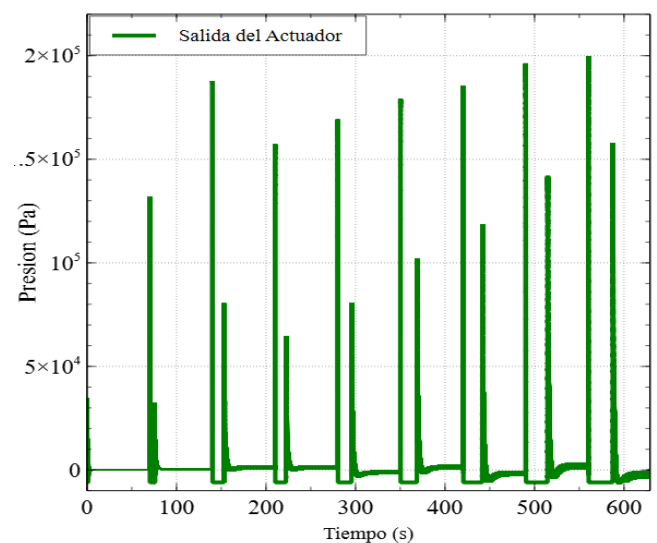


Fig. 9. Señal del actuador neumático con controlador PID.

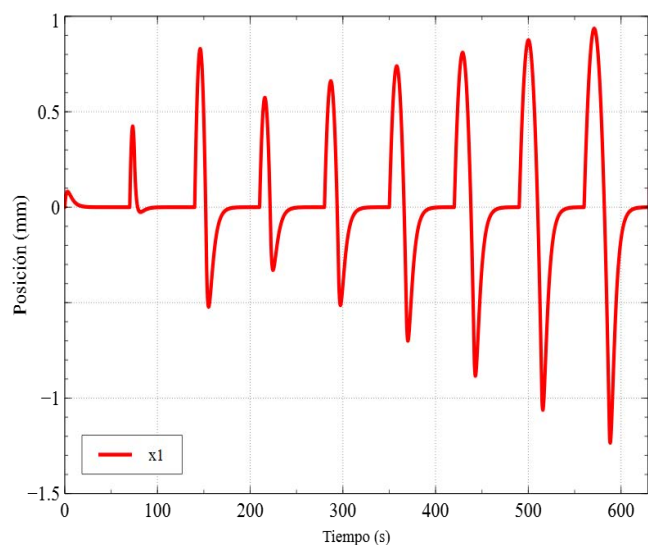


Fig. 10. Salida del sistema $x_1(t)$: posición del pistón bajo presión controlada.

III. CONCLUSIONES

En este documento se presentó el modelo en espacio de estados y se evaluó el sistema en lazo cerrado para la regulación automática de presión, tomando como referencia una balanza de pesos muertos y considerando un modelo físico con condiciones ambientales variables. Se determinó que el sistema es inherentemente inestable, debido a la presencia de dos polos en el origen, lo que hace necesaria la implementación de un sistema de control de lazo cerrado.

Se analizaron tres tipos de controladores: PD, PI y PID, por medio de simulaciones en MATLAB/Simulink, evaluando y comparando sus respuestas y propiedades. Los resultados mostraron que, el controlador PI genera inestabilidad bajo las condiciones evaluadas. El controlador PD, aunque ofrece una respuesta rápida y amortiguada, cambia el punto de equilibrio dependiendo de los parámetros de entrada o condiciones ambientales del sistema.

El controlador PID mantuvo el punto de equilibrio original incluso ante cambios en los parámetros evaluados, ofreciendo mejores respuestas transitoria y en estado estacionario comparadas con la de los otros controladores.

En trabajos futuros se prevé implementar dicho sistema de control en una plataforma física, con el objetivo de validar experimental los resultados obtenidos en simulación.

REFERENCIAS

- [1] J. D. Pereira, "Pressure sensors: Working principles of static and dynamic calibration," *Sensors*, vol. 24, no. 2, p. 629, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24020629.
- [2] B. Shi, L. Xiong, and Z. Yu, "Pressure estimation based on vehicle dynamics considering the evolution of the brake linings' coefficient of friction," *Actuators*, vol. 10, no. 4, p. 76, 2021, doi: 10.3390/act10040076.
- [3] G. Li, X. Wei, Z. Wang, and H. Bao, "Study on the pressure regulation method of new automatic pressure regulating valve in the electronically

controlled pneumatic brake systems in commercial vehicles," *Sensors*, vol. 22, no. 12, p. 4599, 2022, doi: 10.3390/s22124599.

- [4] L.L. Gutiérrez Cortés, "Diseño de un sistema de automatización para una cámara de vacío empleada para la calibración de barómetros en presión absoluta", *Fundación Universidad de America*, 2022.
- [5] A. Martínez, M. López, and J. Torres, "Calibración de un sistema de distribución de agua complejo a partir de variables SCADA", *Revista de Ingeniería Hidráulica*, vol. 14, no. 2, 2020.
- [6] J. Torres Guzmán, B. Soriano Cardona, and P. Olvera Arana, "Medición primaria de presión barométrica", in *Memorias del 2do Congreso Internacional Metrocal*, Chile, 2001.
- [7] P. O. Arana, J. C. T. Guzmán, and J. A. Suárez, "Ensayo de aptitud no. CENAM-EA-720/P.01 en el intervalo de medición de 7 MPa a 50 MPa en presión hidráulica," *Simposio de Metrología*, Oct, 2006.
- [8] C. M. Sutton, "The pressure balance as an absolute pressure standard," *Metrologia*, vol. 30, pp. 591-594, 1993.
- [9] *Instrumentos de medición-manómetros con elemento elastico-método de calibración con balanza de pesos muertos*, NMX-CH-058-1994, SCFI, 1994.
- [10] K. Ogata, *Modern control engineering*, 5th ed. Prentice Hall, 2009.

BIOGRAFIAS



SAMUEL ORTEGA CANO Ingeniero Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México. Estudiante de la Maestría en Ingeniería Electrónica del Tecnológico Nacional de México/ ITS de Irapuato.



JOSÉ JUAN ALFARO RODRÍGUEZ Profesor asociado de tiempo completo adscrito a la División de Ingeniería Electrónica, del Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato. El área de interés es el control e inversores multinivel con aplicaciones a sistemas eléctricos de energías renovables.



JOSÉ MIGUEL SOSA ZÚÑIGA Profesor titular del Tecnológico de México, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, TecNM-ITESI. Actualmente está asociado a los programas de licenciatura y maestría en ingeniería electrónica de dicho instituto. Sus intereses de investigación se enfocan en el área de control y aplicaciones a electrónica de potencia.

Ajakatl. Sistema Abierto De Bajo Costo Para Monitoreo De Calidad Del Aire Basado En IoT

EDGAR LEDEZMA ZAVALA, JOSÉ FEDERICO VELÁZQUEZ VALDEZ, LAURA YANETH SICAIROS MEDINA.

Universidad Tecnológica de Culiacán
edgar.ledezma@utculiacan.edu.mx
23040011@utculiacan.edu.mx
laura.sicairos@utculiacan.edu.mx

RESUMEN Este artículo presenta el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo remoto de calidad del aire basado en tecnologías del Internet de las Cosas (IoT), utilizando el sensor PMS5003 para la detección de partículas PM 1.0, PM 2.5 y PM 10. El sistema está diseñado para recolectar datos en tiempo real y visualizarlos mediante la plataforma Thingspeak, permitiendo una lectura continua de los niveles de contaminación atmosférica. Como iniciativa de código abierto, este prototipo desarrollado en la Universidad Tecnológica de Culiacán está disponible para ser replicado o adaptado por comunidades, instituciones educativas o gubernamentales, con el objetivo de facilitar el monitoreo ambiental a bajo costo. La solución contribuye a la generación de datos accesibles para decisiones en salud pública y concientización ambiental.

PALABRAS CLAVE— Calidad del aire, PMS5003, monitoreo ambiental.

I. INTRODUCCIÓN

El propósito de este proyecto es desarrollar e implementar un sistema de monitoreo remoto de la calidad del aire utilizando tecnologías de Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) para detectar la concentración de partículas finas (PM 10, 2.5 y 1.0) en el ambiente. Este sistema proporciona una solución eficiente y accesible para recolectar, analizar y visualizar datos de calidad del aire en tiempo real, facilitando el acceso a información clave para la toma de decisiones informadas en temas de salud y medio ambiente. En particular, el sistema propuesto emplea el sensor PMS5003 para detectar partículas finas en el aire y envía los datos a la plataforma Thingspeak, donde son analizados y presentados visualmente.

Este proyecto se enmarca dentro de la creciente necesidad de monitorear la calidad del aire en áreas urbanas e industriales, donde la contaminación atmosférica tiene impactos negativos comprobados en la salud humana y en el medio ambiente. Con niveles elevados de partículas PM 2.5 y PM 10 asociados a enfermedades respiratorias y cardiovasculares, el monitoreo constante y accesible de estos contaminantes se convierte en una herramienta esencial para la protección de la salud pública, pues según la Organización Mundial de la Salud, cada año se pierden millones de vidas debido a la exposición a contaminación en el aire [1]. Este sistema ofrece una solución de monitoreo asequible y escalable que puede ser implementada en diversas localidades, incluyendo espacios públicos, residenciales y corporativos.

La implementación de un sistema de monitoreo remoto de calidad del aire permite obtener datos precisos y en tiempo real que sean accesibles desde cualquier dispositivo conectado a internet. Esta solución tecnológica puede ser utilizada tanto por individuos como por instituciones para evaluar la calidad del aire de una forma continua y a bajo costo, proporcionando información valiosa para iniciativas de salud pública, regulaciones ambientales y campañas de concienciación.

El desarrollo tecnológico propuesto se centra en la creación de un producto completo y funcional que integra hardware y software, brindando una solución robusta de IoT para monitorear la calidad del aire.

II. ANTECEDENTES

Las soluciones PM 10, 2.5 y 1.0 de bajo costo presentan un potencial significativo para mejorar el monitoreo y la gestión de la calidad del aire en los países en desarrollo y las zonas urbanas incrementando la resolución espacio-temporal de las mediciones, al poder incrementar la frecuencia y la cantidad de sensores desplegados [2]. Estas soluciones no solo proporcionan alternativas asequibles a los sistemas tradicionales de monitoreo de la calidad del aire, sino que también mejoran la conciencia pública y la participación en el tratamiento de los problemas de contaminación del aire [3]. En las siguientes secciones se describen ejemplos de aplicaciones clave y los aspectos de escalabilidad de estas tecnologías.

A. APLICACIONES EN ÁREAS URBANAS

1. Monitoreo en tiempo real.

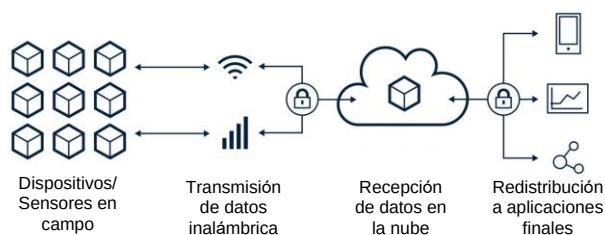


Fig. 1. Arquitectura de la integración realizada.

Los kits de sensores de bajo costo, como el sensor AirQO, permiten el monitoreo de la calidad del aire en tiempo real, proporcionando datos críticos para la planificación urbana y las iniciativas de salud pública [4].

2. Predicción analítica.

Los sistemas que integran modelos de Inteligencia Artificial con sensores de bajo costo, como los desplegados en la ciudad de Lima, Peru, pueden pronosticar la calidad del aire, ayudando a los ciudadanos a evitar áreas de alto riesgo [5].

3. Soluciones para el hogar.

Los sistemas de purificación de aire rentables que utilizan sensores PM 2.5 de bajo costo pueden reducir significativamente la contaminación interior, haciéndolos viables para los hogares en entornos de bajos recursos [6].

B. POTENCIAL DE ESCALABILIDAD

Si bien las soluciones PM 2.5 de bajo costo ofrecen beneficios prometedores, se deben abordar desafíos como el mantenimiento, la precisión de los datos y la conciencia pública para garantizar su efectividad y sostenibilidad a largo plazo.

1. Implementación a gran escala.

La asequibilidad de estas tecnologías permite un despliegue extenso en diversos entornos urbanos, particularmente en entornos de bajos recursos [4]. El uso de marcos de IoT, como el sistema Green IoT basado en IoT, facilita el monitoreo remoto y la recopilación de datos, mejorando la escalabilidad y la eficiencia operativa [7].

Al momento de la escalabilidad de proyectos de IoT existen retos comunes como la seguridad, la administración de dispositivos y la disponibilidad de conectividad. La plataforma propuesta utiliza Particle IoT, una plataforma IoT de grado empresarial, con capacidades para escalar fácilmente de 1 a 100 000 dispositivos sin necesidad de integrar diferentes tecnologías, proveedores de hardware o proveedores de internet [8].

2. Compromiso comunitario.

Las soluciones de bajo costo empoderan a las comunidades para participar activamente en la gestión de la calidad del aire, fomentando la propiedad y responsabilidad local a través de nuevos enfoques como el crowdsensing (censado colectivo) [9]. Otro ejemplo que demuestra una creciente escalabilidad y participación ciudadana en el monitoreo ambiental es la red de sensores “Redspira”, que en este momento monitorea 16 municipios en México, con 117 sensores, cerca de 100 voluntarios y 85 escuelas involucradas en el proyecto [10].

III. DESARROLLO

A. ARQUITECTURA

La Fig. 1 muestra de manera general la arquitectura final utilizada para el desarrollo del sistema. En las siguientes secciones se entrará a detalles los dispositivos de hardware y desarrollo de software utilizados para implementar dicha arquitectura.

B. HARDWARE

Como entorno de desarrollo, se optó por utilizar la plataforma de Particle [11] y su tercera generación de dispositivos, y, el sensor de partículas PMS5003.

1. Microcontrolador Particle Argon.

Particle ofrece en su tercera generación de dispositivos, opciones diferentes de microcontroladores, cada uno con distintas características. Dependiendo de las redes disponibles para transmitir información a la nube. Para ello se pueden utilizar ya sea Wifi con el Argon, o la red celular con LTE o 3G/2G con el Boron. Otra ventaja es que utilizan la arquitectura de las tarjetas Feather [12] de Adafruit, volviéndolos compatibles con otros periféricos, además de incluir un puerto para batería de polímero de litio y circuitería integrada para el manejo de la carga de la batería. Ambos modelos comparten un chip Nordic nRF52840 con un procesador ARM Cortex-M4F de 32 bits, 1 Mb de memoria flash, 256 Kb de RAM, Bluetooth 5, modulo criptográfico ARM TrustZone para la encriptación de las comunicaciones y una tarjeta NFC integrada. Finalmente, el último punto a consideración para su uso fue que utilizan el mismo lenguaje de programación que las populares tarjetas de Arduino, disminuyendo la barrera de entrada para aprender a utilizarlas.

2. Sensor de partículas PMS5003.

TABLA I. PARÁMETROS TÉCNICOS PMS5003

Parámetro	Índice	Unidad
Rango de mediciones	0.3~1.0 ; 1.0~2.5 ; 2.5~10	μm
Efectividad de conteo	50%@0.3 μm ; 98%@≥0.5 μm	
Rango efectivo	0 - 500	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Resolución	1	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Error de consistencia	±10%@100-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ±10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ @0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Tiempo de respuesta unitario	<1	s
Tiempo de respuesta total	≤10	s
Voltaje de alimentación CD	Tip:5.0 ; Min:4.5 ; Max:5.5	V
Corriente en modo activo	≤100	mA
Corriente en reposo	≤200	μA
Temperatura de operación	-10 a +60	°C
HR de operación	0 – 99	% HR
Tiempo medio para fallas (MTTF)	≥3	años

El sensor de partículas PMS5003, es un sensor que utiliza un método de dispersión laser para irradiar las partículas en suspensión presentes en el aire, y posteriormente recoge la luz dispersada para obtener una curva de variación de la luz dispersa en función del tiempo. Un microprocesador interno calcula el diámetro equivalente de las partículas y la cantidad de partículas por unidad de volumen según su tamaño, permitiendo obtener mediciones confiables de concentraciones de partículas PM2.5 (aquellas con un diámetro de 2.5 micras o menor) [13]. La Tabla I se muestran los parámetros técnicos del sensor PMS5003 [14].

En un estudio realizado en Sarajevo, la capital de Bosnia-Herzegovina en 2020, muestra prometedores coeficientes de determinación R^2 de entre 0.90 y 0.99 al comparar las mediciones del PMS5003 con un espectrómetro de alta gama 11-D, en un periodo y zona con concentraciones promedio de 83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, cuando las concentraciones promedio bajaban a cerca de los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el coeficiente R^2 variaba entre 0.28 a 0.92 [15]. El sensor utilizado en la presente propuesta cuenta con las calibraciones realizadas de fábrica, sin embargo, se reconoce la necesidad de calibración sobre todo en ambientes de alta humedad relativa puede reducir el error cuadrático medio hasta en 40% [16].

3. Diseño de PCB.

Para facilitar y garantizar una conexión estable entre el microcontrolador y el sensor de partículas, se diseñó una placa de circuito impreso personalizada. La Fig. 2, Fig. 3 y Fig. 4 muestran los resultados de dicho proceso de diseño. Como plataforma de diseño se utilizó EasyEDA, por su simplicidad de conexión con el fabricante JLCPCB para mandar fabricar los diseños realizados.

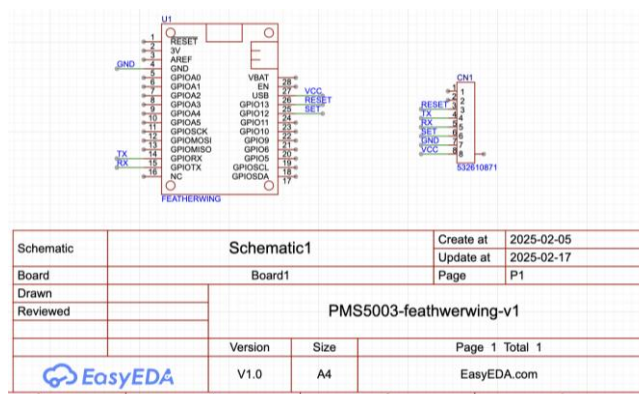


Fig. 2. Diseño esquemático del PCB.

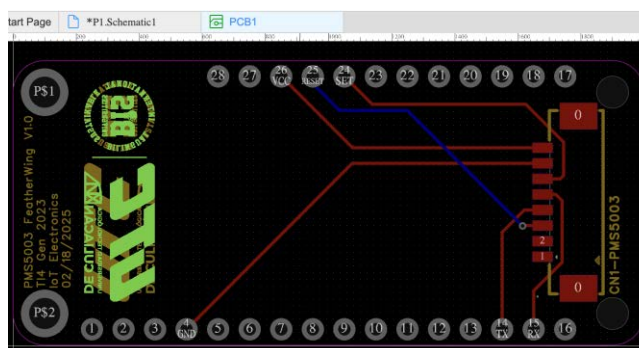


Fig. 3. Diseño de tarjeta del PCB.

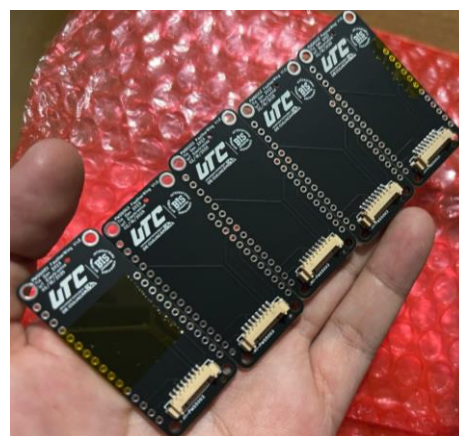


Fig. 4. Tarjetas PCB fabricadas y ensambladas.

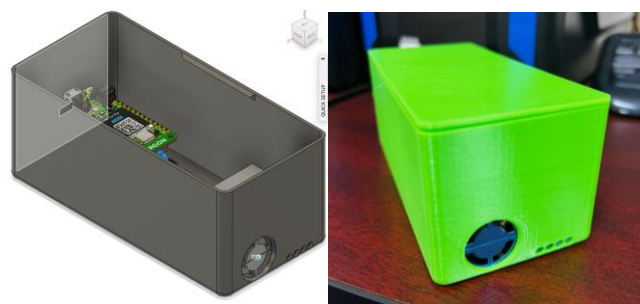


Fig. 5. Diseño de carcasa protectora.

4. Diseño de carcasa protectora.

Para proteger y contener al sensor y al microcontrolador de la intemperie, se diseñó una carcasa personalizada impresa en 3D utilizando el software Fusion 360, mostrada en la Fig. 5. Si bien existen productos comerciales diseñados para encapsular productos electrónicos, se comparte el diseño para imprimir en cualquier impresora 3D continuando con la filosofía abierta del proyecto. Para nuestro caso se imprimió utilizando como material el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) pues presenta una combinación intermedia entre resistencia a los rayos UV, al calor y resistencia mecánica. Sin embargo, se reporta que la mejor opción como material para impresoras de deposición de material (FDM) para exteriores es el Acrilonitrilo estireno acrilato (ASA) [17].

C. SOFTWARE

1. Firmware microcontrolador Particle Argon.

Como se mencionó previamente, una de las ventajas de los dispositivos de Particle, es que utilizan el mismo wrapper simplificado de programación de C/C++. Una ventaja adicional, es que utilizando la plataforma de Particle, toda la conectividad a internet ya sea por medio de la red Wifi o red celular, es controlada completamente por el sistema operativo (SO) del dispositivo, facilitando las tareas de conectividad remota al usuario. El código en extenso utilizado podrá consultarse en el repositorio del apartado de código abierto en la sección de conclusiones, sin embargo, para ejemplificar la facilidad de uso de la conectividad, podemos analizar la línea 85 del código encargada de transmitir los datos PM del sensor hacia la nube de Particle: `"Particle.publish("pmsSensor",buf);"` El primer argumento "pmsSensor" es el nombre del evento con el cual se publica la información a la nube, este nombre es importante pues será referenciado más adelante al momento de crear la integración http; y el segundo argumento "buf" corresponde a la variable del microcontrolador a publicar, en este caso al buffer de datos entregado por el sensor PMS5003 [18]. La Fig. 6 muestra la información recibida en la consola de administración web de Particle.

2. Webhook http.

Para reenviar la información recibida en la consola de Particle hacia la plataforma de visualización Thingspeak, se creó una integración webhook haciendo uso de la API rest de Thingspeak. Siguiendo su documentación [19] se realiza una solicitud http tipo POST al endpoint <https://api.thingspeak.com/update.json> con las configuraciones indicadas en la Fig. 7.

3. Plataforma de visualización Thingspeak

Una vez transmitida la información de la plataforma de Particle utilizando el webhook http, la visualización gráfica de los datos reportados por el sensor pueden ser visualizados

en el canal público de la Universidad Tecnológica de Culiacán en la dirección url <https://thingspeak.mathworks.com/channels/443464>. La Fig. 8 muestra una visualización de dicha plataforma.

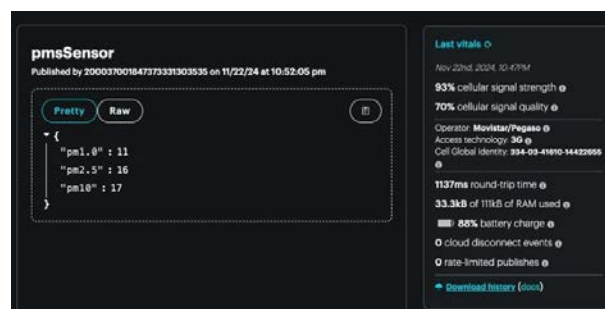


Fig. 6. Evento pmsSensor en la consola web de Particle.

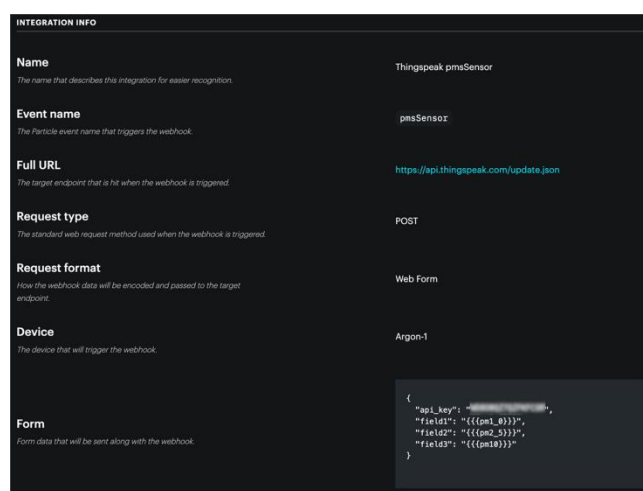


Fig. 7. Configuración webhook http.

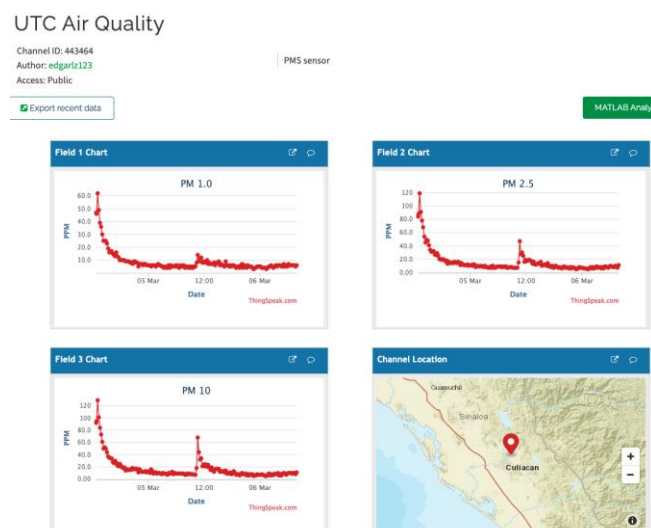


Fig. 8. Canal público de Thingspeak con datos del PMS5003.

TABLA II. COMPARATIVA DE PRECIOS SOLUCIONES COMERCIALES

Elemento / Dispositivo	Costo aprox. (USD)	Fuente
PMS5003	21	[20]
Particle Photon 2 (sucesor Argon)	17.95	[21]
PCB (5 pzs)	4 fabricación JLCPCB 13.65 ensamble conector 20 envío a Méx	[22]
Impresión 3D carcasa	1	*
Total sistema propuesto	47.48 / unidad	
AirQO usado en [4]	150	[23]
Sensor Redspira	250	[10]
PurpleAir Classic Plus	239 sensor 45 fuente de alimentación	[24]
TSI DustTrak II 8530	5k	[25]
GRIMM 11D	10k – 20k	[26]
Estaciones de monitoreo de referencia	50k – 250k	[26]

*Calculadora propia, considerando material, energía, desgaste del equipo y honorarios del operador.

IV. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado permite una medición eficiente y económica de la calidad del aire, utilizando componentes accesibles y tecnologías ampliamente disponibles. En la [Tabla II](#) se muestra una comparativa de la solución propuesta y otras alternativas de bajo costo y otros sensores usados de referencia. El costo actual puede ser mejorado aún más mediante economías de escala. Por ejemplo, en este momento se utiliza la tarjeta de desarrollo Argon (y en lo sucesivo será sustituida por el Photon 2) y adicional a la tarjeta de desarrollo se manda fabricar el PCB que sirve de conector entre el microcontrolador y el sensor. Es posible diseñar una tarjeta personalizada utilizando de referencia el Argon/Photon 2, y añadiendo el conector necesario en una única PCB. Adicionalmente, su carácter abierto y escalable lo hace ideal para adaptarse a contextos diversos, promoviendo la conciencia ambiental y la toma de decisiones informadas en salud y medio ambiente.

Toda la información del sistema ha sido documentada y publicada como proyecto de código abierto, incluyendo diagramas de conexión, código fuente, instrucciones de montaje y configuración de la nube y puede ser consultada en el repositorio público de la Universidad Tecnológica de Culiacán de Github, disponible en la dirección <https://github.com/utculiacan/ajakatl> [18].

Como trabajo futuro se buscará integrar el estándar propuesto por el proyecto Flatburn del MIT Senseable City Lab, con el fin de mejorar la conectividad y compatibilidad internacional del sistema. Flatburn utiliza el ecosistema de Particle como entorno de desarrollo al igual que nuestra solución propuesta, volviendo inter-compatibles el firmware y el hardware desarrollados para ambas soluciones [27]. Asimismo, se explorarán los métodos de calibración

utilizados en Flatburn para garantizar mayor precisión en las lecturas obtenidas con sensores de bajo costo [28]. Con esto se busca aumentar la tracción del proyecto, facilitar su adopción por comunidades y autoridades, y acelerar integraciones con plataformas y repositorios existentes a escala global.

REFERENCIAS

- [1] “WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide”. Consultado: el 19 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [2] F. M. J. Bulot et al., “Characterisation and calibration of low-cost PM sensors at high temporal resolution to reference-grade performance”, *Heliyon*, vol. 9, núm. 5, p. e15943, may 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15943.
- [3] M. Shabbir, T. Saeed, A. Saleem, P. Bhawe, M. Bergin, y M. F. Khokhar, “A paradigm shift: Low-cost sensors for effective air quality monitoring and management in developing countries”, *Environ. Int.*, vol. 200, p. 109521, jun. 2025, doi: 10.1016/j.envint.2025.109521.
- [4] E. Bainomugisha et al., “AirQo sensor kit: A particulate matter air quality sensing kit custom designed for low-resource settings”, *HardwareX*, vol. 16, p. e00482, dic. 2023, doi: 10.1016/j.ohx.2023.e00482.
- [5] L. Montalvo, D. Fosca, D. Paredes, M. Abarca, C. Saito, y E. Villanueva, “An Air Quality Monitoring and Forecasting System for Lima City With Low-Cost Sensors and Artificial Intelligence Models”, *Front. Sustain. Cities*, vol. 4, jul. 2022, doi: 10.3389/frsc.2022.849762.
- [6] M. Janyasupab y J. Yongwiwat, “Low-Cost PM 2.5 Sensor and Cost-Effective Air Purification Study for Household Implementation”, en *2022 37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, jul. 2022, pp. 601–604, doi: 10.1109/ITC-CSCC55581.2022.9895085.
- [7] A. Purnomo et al., “An Affordable Green IoT-Based System for Remote Sensing of PM1, PM2.5 and PM10 Particulate Matter”, *J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 49, núm. 2, pp. 134–148, ago. 2024, doi: 10.37934/araset.49.2.134148.
- [8] “IoT Scalability: What It Means, Common Challenges, and How to Scale Effectively”, Particle. Consultado: el 20 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.particle.io/iot-guides-and-resources/iot-scalability/>
- [9] A. Hernández-Gordillo, S. Ruiz-Correa, V. Robledo-Valero, C. Hernández-Rosales, y S. Arriaga, “Recent advancements in low-cost portable sensors for urban and indoor air quality monitoring”, *Air Qual. Atmosphere Health*, vol. 14, núm. 12, pp. 1931–1951, dic. 2021, doi: 10.1007/s11869-021-01067-x.
- [10] “Redspira - Calidad del aire”. Consultado: el 20 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.redspira.org/>
- [11] “An Integrated IoT Platform-as-a-Service”, Particle. Consultado: el 25 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.particle.io/>
- [12] “Feather Specification | Introducing Adafruit Feather | Adafruit Learning System”. Consultado: el 25 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/adafruit-feather/feather-specification>
- [13] “Overview | PM2.5 Air Quality Sensor | Adafruit Learning System”. Consultado: el 25 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/pm25-air-quality-sensor/overview>
- [14] “PMS5003 Series Manual Datasheet by Adafruit Industries LLC | Digi-Key Electronics”. Consultado: el 20 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.digikey.jp/htmldatasheets/production/2903006/0/0/1/pms5003-series-manual.html>
- [15] A. Masic, D. Bibic, B. Pikula, A. Blazevic, J. Huremovic, y S. Zero, “Evaluation of optical particulate matter sensors under realistic conditions of strong and mild urban pollution”, *Atmospheric Meas. Tech.*, vol. 13, núm. 12, pp. 6427–6443, nov. 2020, doi: 10.5194/amt-13-6427-2020.

- [16] M. Y. Patel, P. F. Vannucci, J. Kim, W. M. Berelson, y R. C. Cohen, "Towards a hygroscopic growth calibration for low-cost PM_{2.5} sensors", *Atmospheric Meas. Tech.*, vol. 17, núm. 3, pp. 1051–1060, feb. 2024, doi: 10.5194/amt-17-1051-2024.
- [17] A. Afshar y R. Wood, "Development of Weather-Resistant 3D Printed Structures by Multi-Material Additive Manufacturing", *J. Compos. Sci.*, vol. 4, núm. 3, p. 94, sep. 2020, doi: 10.3390/jcs4030094.
- [18] "utculiacan/ajakatl: Open source PM 2.5 IoT sensor". Consultado: el 27 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/utculiacan/ajakatl/tree/main>
- [19] "Write Data - Update channel data with HTTP GET or POST - MATLAB". Consultado: el 26 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/writedata.html>
- [20] "PMS5003 Sensor de calidad de aire PM2.5", UNIT Electronics. Consultado: el 20 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://uelectronics.com/producto/pms5003-sensor-de-calidad-de-aire-pm2-5/>
- [21] "Photon 2", Particle store. Consultado: el 20 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://store.particle.io/products/photon-2>
- [22] "PCB Prototype & PCB Fabrication Manufacturer - JLCPCB". Consultado: el 20 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cart.jlpcb.com/quote>
- [23] "These low-cost sensors are helping Uganda tackle rising air pollution", World Economic Forum. Consultado: el 20 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.weforum.org/stories/2022/06/ugandan-researchers-low-cost-sensors-air-pollution/>
- [24] "PurpleAir Classic Plus - Air Quality Monitor", PurpleAir. Consultado: el 20 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www2.purpleair.com/products/classic-plus-air-quality-monitor>
- [25] "TSI DustTrak II 8530 Desktop Aerosol Monitor", RPA - Face Fit. Consultado: el 20 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.face-fit.co.uk/product/tsi-dustrak-ii-desktop-aerosol-monitor/>
- [26] K. Ardon-Dryer, M. C. Kelley, X. Xueting, y Y. Dryer, "The Aerosol Research Observation Station (AEROS)", *Atmospheric Meas. Tech.*, vol. 15, núm. 8, pp. 2345–2360, abr. 2022, doi: 10.5194/amt-15-2345-2022.
- [27] MIT-Senseable-City-Lab, "flatburn/Build/Firmware at main · MIT-Senseable-City-Lab/flatburn", GitHub. Consultado: el 20 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/MIT-Senseable-City-Lab/flatburn/tree/main/Build/Firmware>
- [28] "OSCS". Consultado: el 26 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://senseable.mit.edu/flatburn/>



JOSÉ FEDERICO VELÁZQUEZ VALDEZ Estudiante de Ingeniería en Redes Inteligentes y Ciberseguridad, con un marcado interés por las distintas ramas de las tecnologías computacionales. Apasionado por el aprendizaje autodidacta, su enfoque actual se centra en el ecosistema AWS, el uso de Arch Linux y el desarrollo de habilidades en ciberseguridad ofensiva y defensiva, utilizando herramientas especializadas tanto en entornos de laboratorio como reales.



M.C. LAURA YANETH SICAIROS MEDINA Cuenta con estudios de maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos por la Universidad Autónoma de Sinaloa, misma institución donde realizó sus estudios de licenciatura en Químico Farmacéutico Biólogo. Actualmente se desempeña como profesora de tiempo completo Asociado C de la Universidad Tecnológica de Culiacán. Es miembro del Sistema

Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos (SSIT) desde 2018, siendo su último nombramiento durante el periodo 2024-2026. Desde 2023 se desempeña como coordinadora del área de sostenibilidad de la universidad, es responsable del laboratorio de Biología Molecular en esta misma institución y participa como miembro del comité editorial de la revista UTCiencia de la UTC. Es miembro del comité organizador de la Feria de Ciencias de la UTC; ha impartido diversas materias a nivel licenciatura y ha participado en direcciones de memorias de estadía de nivel licenciatura y Técnico Superior Universitario de las carreras de tecnología ambiental, energías renovables y Tecnologías de la Información. Ha participado en eventos de difusión y vinculación, como asesora de diversos proyectos relacionados con el desarrollo sostenible.

BIOGRAFÍAS



EDGAR LEDEZMA ZAVALA Ing. en Mecatrónica, graduado con honores del Tecnológico de Monterrey. Maestro en ciencias con especialidad en Sistemas de Manufactura en conjunto con el Tec de Monterrey y Massachusetts Institute of Technology. Certificado por Stanford University en tópicos de inteligencia artificial. Graduado del programa de innovación y emprendimiento "StartMIT". Experto en automatización y robótica aplicada. Amplia

experiencia en manejo de proyectos de investigación en manufactura avanzada, especializado en temas de Internet de las Cosas, Industria 4.0 y Realidad Aumentada. Cofundador del InnovationLab en la Universidad Tecnológica de Culiacán, espacio dedicado a la innovación desde 2018. Fundador de Technologies for Any Company, empresa dedicada al desarrollo e implementación de tecnología en la nube desde 2019. En general, apasionado por la tecnología e impulsor del desarrollo científico, tecnológico y económico en México.

Detección de Imágenes Deepfake con Redes Neuronales Convolucionales

JESUS ANTONIO CISNEROS RIVERA, MISAEL LOPEZ RAMIREZ, LUIS MANUEL LEDEZMA CARRILLO.

Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato – Salamanca, Departamento de Estudios Multidisciplinarios

ja.cisnerosrivera@ugto.mx

lopez.misael@ugto.mx

lm.ledesma@ugto.mx

RESUMEN Las Redes Neuronales Convolucionales han demostrado ser prometedoras para tareas de clasificación y reconocimiento de imágenes en los últimos años. En el presente trabajo se desarrolló y evaluó un modelo de CNN diseñado para detectar y clasificar imágenes que han sido manipuladas con técnicas de aprendizaje profundo, estas imágenes son conocidas como deepfake. El entrenamiento se realizó con el conjunto de datos de Faceforensics++, el rendimiento del modelo es evaluado con las métricas exactitud, precisión, Recall y F1-Score. Los resultados del modelo son comparados con los resultados de arquitecturas preentrenados de Keras. Los resultados demuestran ser relevantes, llegando a superar a las arquitecturas de Keras.

PALABRAS CLAVE — deepfake, cnn, imágenes

I. INTRODUCCIÓN

Las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) han obtenido bastante popularidad en los últimos años, para la detección y la clasificación en imágenes. Algunos de esos modelos son diseñados para diferenciar entre imágenes que han sido manipuladas utilizando técnicas de aprendizaje profundo (DL), específicamente Redes Generativas Antagónicas (GANs) [1]. Alguna de las preocupaciones de los deepfake es: la manera rápida y descontrolada en la que se propagan los convierte en una gran amenaza. No obstante, se suelen crear para el entretenimiento con el fin de ser humorístico [2]. Pero, hay casos que se usan de manera maliciosa, donde incluye temas tales como el fraude y manipulación de información.

Para enfrentar esta problemática, se han desarrollado distintos modelos con y sin arquitectura CNN. Por ejemplo, en este artículo se exploró la aplicación de la arquitectura Vision Transformer (ViT) para la detección de imágenes Deepfake. Es una alternativa a los modelos convolucionales que procesan imágenes. Demuestra que la implementación y el entrenamiento del modelo fueron exitosos, pero su desempeño para clasificar las imágenes reales y manipuladas no fue el esperado. Sugieren que las posibles causas de este resultado son factores como el sobreajuste inicial, la resolución de las imágenes y la alta variabilidad del conjunto de datos [3]. Por otra parte, dentro de la arquitectura CNN para la detección de deepfakes. Estos modelos demuestran ser prometedores para la detección del contenido que ha sido manipulado [4, 5]. Los modelos ya tienen una precisión bastante buena que llegan a superar el 90% [6, 7]. Cada uno de ellos contiene su propia característica, por ejemplo: utilizan 7 conjuntos de datos diferentes y la función de

perdida entropía cruzada binaria. Desarrollan un marco de entrenamiento solido capaz de minimizar la distorsión de imagen [8]. En este trabajo se combina una Red Convolucional para la extracción de características y una red recurrente para el análisis temporal. Para la extracción de características, se utilizó la arquitectura InceptionV3 preentrenada en ImageNet. Se evaluaron tres arquitecturas de RNN para la clasificación: GRU, BI-LSTM y Bi-GRU. Los resultados demostraron que el modelo con GRU fue el más efectivo ya que supero a las otras variaciones. Pero el modelo tiene limitaciones a no lograr detectar Deepfakes de alta calidad [9]. En este trabajo se enfoca en la detección de imágenes que estarían en la vida cotidiana, donde los datos no están en un ambiente controlado, provocando que el modelo pierda velocidad, pero su eficacia sea mayor del 70% [10]. En este artículo se aborda la detección de deepfakes analizando sus estilos de movimiento. Además, presentan una nueva técnica para restaurar los fotogramas originales de un video manipulado [11].

Por otro lado, en este trabajo usan el dominio de la frecuencia, en lugar del dominio espacial para detectar deepfakes. Evitando tener muchos parámetros, lo que implica: bajos costos computacionales, menos tiempo de procesamiento y memoria [12]. También existe un modelo con sistema avanzado que combina redes convolucionales, extraen características usando CNN, después usan una capa de red neuronal recurrente para capturar cómo cambian las expresiones fáciles y finalmente usan una red llamada Recycle-GAN, que combina la forma del rostro y como se mueve, para detectar si es falso [13]. Por último, existen varias arquitecturas preentrenadas disponibles en Keras [14]. Son ampliamente reconocidas por la comunidad,

específicamente ResNet50, MobileNet, Xception y NASNetLarge [15-18] que han demostrado tener una gran eficacia en clasificar imágenes. Este otro trabajo se centra en la evaluación de modelos preentrenados para abordar el desafío de la detección de deepfakes. Exploró diferentes arquitecturas logrando un balance entre eficiencia y bajo coste computacional. Los resultados obtenidos demuestran el potencial para estas arquitecturas, donde sientan las bases para futuras aplicaciones en sistemas con recursos limitados [19].

En esta propuesta se diseñó e implementó un modelo basado en CNN orientado a la detección de imágenes deepfake. El objetivo principal fue desarrollar un modelo optimizado que superara en términos de desempeño a las arquitecturas preentrenadas, que, si bien logran altos niveles de precisión, tienen una alta demanda computacional. Para ello, se realizaron ajustes específicos en la arquitectura de la red y en los procesos de entrenamiento, con el fin de reducir los errores de clasificación y el tiempo de entrenamiento. Este modelo mantiene un rendimiento que sea competente, pero con una reducción en el número de parámetros y el tiempo de ejecución. Los resultados demostraron que el modelo propuesto logró una mayor precisión, superando a las arquitecturas preentrenadas en distintas métricas de evaluación, lo que respalda la eficacia a la hora de detectar deepfakes.

II. DESARROLLO

Esta sección se encuentra organizada en cuatro apartados. En *Conjunto de Datos* se describe el origen de los datos empleados para el entrenamiento y la prueba del modelo, así como el preprocesamiento aplicado a cada una de las imágenes. En *Modelo*, se explica la arquitectura del modelo CNN y los parámetros que fueron ajustados. En *Librerías* se especifica el lenguaje de programación utilizado junto con las librerías necesarias para el desarrollo. Finalmente, en *Métricas* se presenta las ecuaciones empleadas para evaluar el rendimiento del modelo.

A. CONJUNTO DE DATOS

Faceforensics++ es el conjunto de datos que se ha utilizado para el entrenamiento del modelo, proporciona 1,000 secuencias de video a los cuales se les aplicó cuatro métodos automatizados de manipulación facial. Los métodos son: Deepfake, Face2Face, FaceSwap y NeuralTexture. Para este caso, se utilizó las secuencias originales y Deepfake. Los videos contienen un formato Raw, además de sus versiones comprimidas con niveles de compresión 23 y 40. Para este trabajo se utilizó el nivel de compresión 40, teniendo menor tamaño y un procesamiento más rápido en los videos [20].

En un trabajo previo, las secuencias de video con y sin manipulaciones fueron sometidas a técnicas de preprocesamiento, como se detalla en [21]. Algunos de los

preprocesamientos aplicados, como se observa en la Fig. 1, incluyen la extracción de rostros, permite reducir la carga computacional de procesar videos al entrenar el modelo; el normalizado, ajusta el valor de los pixeles al mismo rango; escalado, para garantizar dimensiones de imágenes uniformes; y organización de datos, separar los datos en distintas carpetas para mantener los datos etiquetados. El preprocesamiento se hace para evitar cargas computacionales, ruido en los datos y deficiencia de precisión en la etapa de entrenamiento.



Fig. 1. Representación de extracción de rostros [21].

B. MODELO

Para este trabajo se ha desarrollado y entrenado un modelo de CNN desde cero. Lo que implica que fue desarrollado específicamente para este problema. El modelo está organizado en capas, que permiten la extracción y el análisis de las características más importantes. Las principales capas para el modelo CNN son la siguientes:

1. Imagen de entrada: Es la imagen original a la cual se les aplicó las técnicas de preprocesamiento.
2. Capa de convolución: Aplica filtros a la imagen de entrada con el fin de extraer las características como bordes, texturas y patrones.
3. Capa de pooling: Reduce el tamaño el mapa de características para resaltar las características más importantes.
4. Capa de aplanamiento: Convierte el mapa de características en un vector unidimensional.
5. Capa densa: Se utiliza en la etapa final para combinar características y realizar predicciones. Esta compuestas por neuronas, donde cada una está conectada a todas las neuronas de la capa anterior.
6. Optimizador ADAM: Ajusta los pesos de la red neuronal con el fin de minimizar el error durante el entrenamiento.

En la Fig. 2 se observa el modelo que está compuesto por tres bloques de capas convolucionales y de max pooling, seguidos por una capa de aplanamiento y una serie de capas densas completamente conectadas. Cada bloque convolucional incrementa el mapa de características, comenzando con 32 filtros en la primera capa, seguido de 64 y 128 filtros. Posteriormente la salida es aplanada y procesada por dos capas densas, con 1024 y 512 unidades respectivamente, lo cual proporciona una base sólida para la

toma de decisiones a partir de las características extraídas. Finalmente, una capa de salida con dos neuronas que se utiliza para realizar la clasificación real y deepfake. Como se puede observar en la [Tabla I](#), la red contiene aproximadamente 26 millones de parámetros entrenables, que están concentrados principalmente en las capas densas.

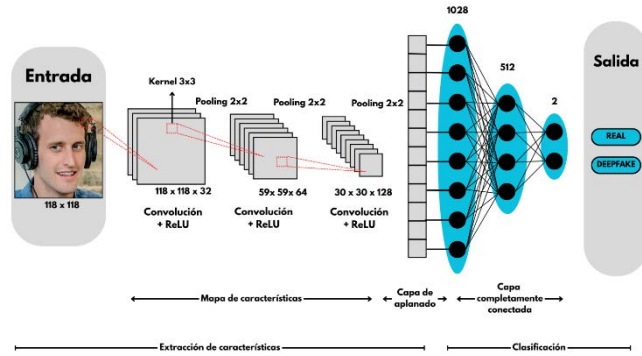


Fig. 2. Estructura del modelo CNN.

TABLA I. REPORTE DEL MODELO CNN

Capa	Salida	Parámetro
conv2d_30 (Conv2D)	(None, 118, 118, 32)	896
max_pooling2d_30 (MaxPooling2D)	(None, 59, 59, 32)	0
conv2d_31 (Conv2D)	(None, 59, 59, 64)	18496
max_pooling2d_31 (MaxPooling2D)	(None, 29, 29, 64)	0
conv2d_32 (Conv2D)	(None, 29, 29, 128)	73856
max_pooling2d_32 (MaxPooling2D)	(None, 14, 14, 128)	0
flatten_10 (Flatten)	(None, 25088)	0
dense_30 (Dense)	(None, 1024)	25691136
dense_31 (Dense)	(None, 512)	524800
dense_32 (Dense)	(None, 2)	1026

Algunos de los hiperparámetros que influyeron en la buena precisión del modelo fueron 23 épocas, que nos permiten establecer la cantidad de veces que el modelo recorrió el conjunto de imágenes. Para tener un equilibrio entre velocidad de entrenamiento y uso de memoria se utilizó un tamaño de lote de 32. La función de activación que se empleó para las capas convolucionales y completa conectadas fue ReLU, además de sigmoide en la última capa de salida para obtener las probabilidades falso y verdadero.

La función de pérdida que se utilizó fue sparse categorical cross-entropy [Ec. \(1\)](#).

$$\mathcal{L} = - \sum_{i=1}^C y_i \cdot \log(P_i) \quad (1)$$

C. LIBRERIAS

El modelo fue desarrollado en el lenguaje de Python, específicamente la versión 3.10 y las librerías que tuvieron un gran impacto al desarrollarlo fueron las siguientes: *TensorFlow* y su API *Keras*, que facilitaron la construcción, entrenamiento del modelo y el manejo eficiente del proceso de validación; *OpenCV*, facilita la manipulación de los frames que contienen los videos para la extracción de los rostros; *scikit-learn*, para la preparación y partición de los datos en conjunto de prueba y entrenamiento; *Numpy*, utilizado para el manejo de matrices y operaciones numéricas; Por último, *Matplotlib*, para la visualización de resultados, logrando obtener graficas informativas

D. MÉTRICAS

Las métricas que son utilizadas por los investigadores para la evaluación del modelo son las siguientes [6].

En la [Ec. \(2\)](#) evalúa el rendimiento general del modelo

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \quad (2)$$

En la [Ec. \(3\)](#) mide la proporción de predicciones positivas correctas sobre todas las predicciones positivas realizadas.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

En la [Ec. \(4\)](#) representa la proporción de casos positivos correctamente identificados sobre el total de casos positivos reales (4).

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

La [Ec. \(5\)](#) es la media armónica entre precisión y recall (5).

$$F1score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

III. RESULTADOS

A continuación, se presenta una comparación entre los modelos pre-entrenados seleccionados y el modelo propuesto. Para esta evaluación se utilizó un conjunto de datos compuestos por 19,990 imágenes, distribuidas equitativamente entre clases: un 50% corresponde a imágenes reales y el 50% restante a imágenes manipuladas. Permitiendo una evaluación justa en la tarea de detección de deepfakes. En la evaluación comparativa que se observa desde la [Fig. 3-6](#), se analizaron cinco modelos empleando diversas métricas de rendimiento. El modelo propuesto,

identificado gráficamente mediante un color distinto, mostró un comportamiento superior al del resto de las arquitecturas evaluadas. Los resultados obtenidos respaldan la robustez del modelo y su efectividad frente a otros modelos basados en arquitectura similares

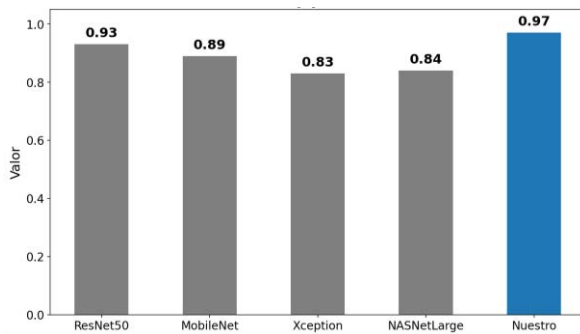


Fig. 3. Accuracy por Modelo

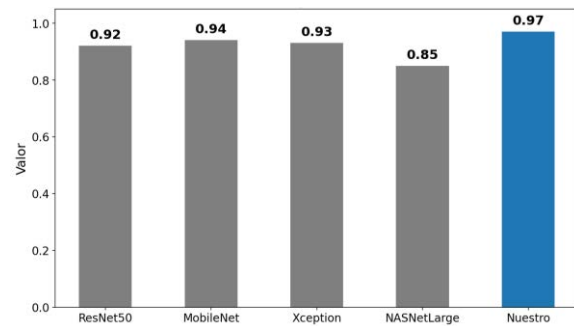


Fig. 4. Recall por Modelo

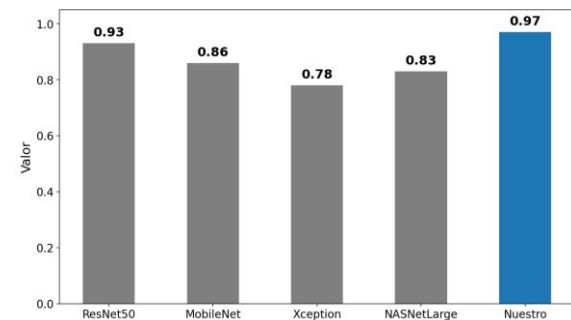


Fig. 5. Precisión por Modelo

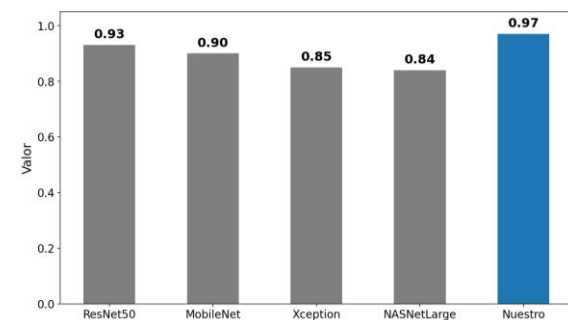


Fig. 6. F1-Score por Modelo

Además de las presentaciones graficas individuales, en la [Tabla II](#) se resumen de forma consolidada los valores obtenidos en cada una de las métricas evaluadas para los modelos analizados. Como se puede observar, el modelo propuesto obtuvo los valores más altos en todas las métricas, lo que refuerza su capacidad de generalización y su superioridad frente a las arquitecturas consideradas en este estudio.

TABLA II. RENDIMIENTO ENTRE DISTINTAS ARQUITECTURAS

Modelo	Accuracy	Precisión	F1-SCORE	Recall
ResNet50	0.93	0.93	0.93	0.92
MobileNet	0.89	0.86	0.90	0.94
Xception	0.83	0.78	0.85	0.93
NASNetLarge	0.84	0.83	0.84	0.85
Nuestro	0.97	0.97	0.97	0.97

IV. CONCLUSIONES

En la actualidad, el avance acelerado de las GAN ha facilitado la creación de contenido manipulado, más conocido como deepfakes. Este tipo de tecnologías representa un riesgo creciente para la integridad de la información visual, la seguridad, privacidad y la desinformación. En este trabajo se propuso un modelo basado en CNN orientado a la detección de imágenes deepfake. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que el modelo superó en eficacia a las distintas arquitecturas preentrenadas. Como trabajo futuro se planea adaptar y extender el modelo para abordar la detección de deepfakes en video, lo que permitirá enfrentar desafíos más complejos relacionados con movimientos detección de los rostros y ruido en la cámara.

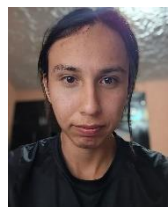
REFERENCIAS

- [1] Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S, et al. Generative adversarial networks. Commun ACM [Internet]. 2020;63(11):139–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.1145/3422622>
- [2] Kietzmann J, Lee LW, McCarthy IP, Kietzmann TC. Deepfakes: Trick or treat? Bus Horiz [Internet]. 2020;63(2):135–46. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2019.11.006>
- [3] O. G. Retolaza-Carlos, “Detección de imágenes DeepFake con Vision Transformers (ViT)”, *ITESO*, may-2025. [Internet]. Available from: <https://rei.iteso.mx/items/d08c4231-fe54-436e-acec-e8cd68697fa7>.
- [4] Thing VLL. Deepfake detection with deep learning: Convolutional neural networks versus Transformers [Internet]. arXiv [cs.CR]. 2023. Available from: <http://arxiv.org/abs/2304.03698>
- [5] Guarnera L, Giudice O, Guarnera F, Ortis A, Puglisi G, Paratore A, et al. The Face Deepfake Detection challenge. J Imaging [Internet]. 2022;8(10):263. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/jimaging8100263>
- [6] Patel Y, Tanwar S, Bhattacharya P, Gupta R, Alsuwian T, Davidson IE, et al. An improved dense CNN architecture for deepfake image detection. IEEE Access [Internet]. 2023;11:22081–95. Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/access.2023.3251417>
- [7] Alnaim NM, Almutairi ZM, Alsuwat MS, Alalawi HH, Alshobaili A, Alenezi FS. DFFMD: A deepfake face mask dataset for infectious disease era with deepfake detection algorithms. IEEE Access

- [Internet]. 2023;11:16711–22. Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/access.2023.3246661>
- [8] Park J, Park LH, Ahn HE, Kwon T. Coexistence of deepfake defenses: Addressing the poisoning challenge. IEEE Access [Internet]. 2024;12:11674–87. Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/access.2024.3353785>
- [9] S. Ballesteros Pastrán and C. Jiménez Varón, Detección de videos multi-rostro manipulados por deepfake a partir de aprendizaje profundo. Universidad de los Andes, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1992/60261>
- [10] Guan L, Liu F, Zhang R, Liu J, Tang Y. MCW: A generalizable deepfake detection method for few-shot learning. Sensors (Basel) [Internet]. 2023;23(21):8763. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/s23218763>
- [11] Zhang H, Lu Z-M, Luo H, Feng Y-P. Restore DeepFakes video frames via identifying individual motion styles. Electron Lett [Internet]. 2021;57(4):183–6. Available from: <http://dx.doi.org/10.1049/ell2.12015>
- [12] Sabareshwar, Raghu, Ravi S, Varalakshmi, P PM. A lightweight CNN for efficient deepfake detection of low-resolution images in frequency domain. En: 2024 Second International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ICETITE). IEEE; 2024. p. 1–6.
- [13] Jolly V, Telrandhe M, Kasat A, Shitole A, Gawande K. CNN based Deep Learning model for Deepfake Detection. En: 2022 2nd Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON). IEEE; 2022.
- [14] Keras: Deep learning for humans [Internet]. Keras.io. [cited 2025 May 6]. Available from: <https://keras.io>
- [15] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep residual learning for image recognition [Internet]. arXiv [cs.CV]. 2015. Available from: <http://arxiv.org/abs/1512.03385>
- [16] Howard AG, Zhu M, Chen B, Kalenichenko D, Wang W, Weyand T, et al. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications [Internet]. arXiv [cs.CV]. 2017. Available from: <http://arxiv.org/abs/1704.04861>
- [17] Chollet F. Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions [Internet]. arXiv [cs.CV]. 2016. Available from: <http://arxiv.org/abs/1610.02357>
- [18] Zoph B, Vasudevan V, Shlens J, Le QV. Learning Transferable Architectures for Scalable Image Recognition [Internet]. arXiv [cs.CV]. 2017. Available from: <http://arxiv.org/abs/1707.07012>
- [19] A. Marco Montejano, Implementación y evaluación de redes convolucionales para la clasificación de imágenes manipuladas digitalmente. Bachelor's thesis, Dept. Tecnología Informática y Computación, Universidad de Alicante, Alicante, Spain, Jul. 2024. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10045/145173>
- [20] A. Rossler, D. Cozzolino, L. Verdoliva, C. Riess, J. Thies, y M. Niessner, “FaceForensics++: Learning to detect manipulated facial images”, en 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2019.

- [21] J. A. Cisneros Rivera, M. López Ramírez, y L. M. Ledesma Carrillo, «Generación de un set de imágenes para la detección de Deepfake en Modelos de Redes Neuronales Convolucionales», *JC*, vol. 33, pp. 1–4, dic. 2024.t

BIOGRAFÍAS



ING. JESUS ANTONIO CISNEROS RIVERA Recibió su título de Ingeniero en Sistemas Computacionales en 2018 y 2023 de la Universidad de Guanajuato, campus Yuriria. Actualmente, cursa la Maestría en Ingeniería en Electrónica en la misma institución.



DR. MISAEL LÓPEZ RAMÍREZ Recibió el grado de Doctorado y Maestro en ingeniería eléctrica de la Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, en 2017, 2013, respectivamente y concluyó una estancia posdoctoral en el Instituto Tecnológico de Aguascalientes, México en el 2019. Se unió a la División de Ingenierías del Campus Irapuato Salamanca de la Universidad de Guanajuato a finales del 2019. Tiene el reconocimiento como miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I (SNI-I) del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SECIHTI). Su investigación actual e intereses incluyen procesamiento digital de imágenes y señales, calidad de energía, sistemas inteligentes, aprendizaje de máquina y sistemas digitales aplicados a industria.



DR. LUIS MANUEL LEDESMA CARRILLO Recibió su título en ingeniería electrónica por parte de la universidad de Guanajuato en el 2011, recibió el grado de maestro en ingeniería eléctrica y doctor en ingeniería eléctrica en las áreas de instrumentación y visión robótica en la misma Universidad de Guanajuato en el 2017, realizó una estancia de investigación en el Center for Optical Research and Education (CORE) en la Universidad de Utsunomiya, Japón. Es miembro de Sistema Nacional de Investigadores nivel 1. Actualmente está trabajando como profesor investigador en el departamento de estudios Multidisciplinarios (Sede Yuriria) de la universidad de Guanajuato, sus áreas de investigación son: el desarrollo de nuevos Sistemas opto-electrónicos para aplicaciones de visión robótica, Análisis Espectral, Análisis Tiempo-Frecuencia, Encriptación de señales e imágenes, análisis de sistemas espacio-fase y sus aplicaciones en la electrónica, Detección de fallas en maquinaria industrial, Diseño en Hardware usando FPGA's y Desarrollo de sistemas de polarimetría para análisis de muestras biológicas.

Localización de Nodos con RSSI Caracterizado en un Escenario Real

JOAQUÍN MASS SÁNCHEZ, ERICA RUIZ IBARRA, ADOLFO ESPINOZA RUIZ, ARMANDO GARCÍA BERUMEN Y ADOLFO SOTO COTA

Department of Electrical Engineering, Sonora Institute of Technology, Ciudad Obregón, Sonora 85130, México
joaquin.mass@itson.edu.mx; jmasss21@gmail.com

RESUMEN La localización es uno de los principales problemas en redes de sensores inalámbricos, ya que proporciona la información de la ubicación de un evento. En este trabajo se evalúa el desempeño de técnicas de localización libres de distancia y basadas en distancia en términos de exactitud y precisión, utilizando el indicador de la fuerza de la señal recibida. La exactitud y precisión de las técnicas de localización analizadas se miden a través del error de localización promedio y la función de distribución de probabilidad acumulada respectivamente; variando el número de nodos de referencia y el nivel ruido. Los resultados obtenidos muestran que las técnicas basadas en distancia presentan mejor exactitud y precisión para niveles bajos de ruido que las técnicas de libres de distancia, mientras que éstas presentan mayor robustez en términos de exactitud al variar el número de nodos de referencia y nivel de ruido.

PALABRAS CLAVE — Localización, RSSI, WSN, CDF, ALE.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricos (WSN - Wireless Sensor Networks) son un conjunto de nodos sensores distribuidos espacialmente, los cuales recopilan y transmiten información sobre su entorno. Estas redes han ganado gran relevancia en algunas aplicaciones, tales como monitoreo ambiental, salud, seguridad, consumo energético y automatización industrial debido a su flexibilidad, bajo costo y facilidad de implementación [1, 2]. Una WSN se compone de tres elementos principales: nodos sensores, enlace de comunicación y la estación base. El desempeño de una WSN depende de algunos factores como eficiencia energética, cobertura, conectividad, capacidad de transmisión de datos y robustez ante interferencias y fallas en la red [3].

Algunas aplicaciones de WSN como el monitoreo ambiental, rastreo de objetos, calidad de la energía, enrutamiento de la información, cuidado de la salud, Internet de las Cosas, Ciudades Inteligentes, redes vehiculares, entre otras [4]; requieren conocer la localización del evento, ya dicha información proporciona la posición geográfica donde ocurre dicho evento.

La localización en WSNs consiste en estimar la posición geográfica de un nodo con posición desconocida o nodo de interés (NOI - Node Of Interest), a través de la posición conocida de los nodos de referencia (RNs - Reference Nodes) y de la información de la distancia entre el NOI y los respectivos nodos de referencia. Una gran variedad de técnicas de localización existentes en la literatura permite el desarrollo de protocolos más eficientes en la red que

optimizan el ahorro de energía y proporcionan un tiempo de respuesta con menor latencia. Ante este problema se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Qué método se puede implementar para localizar de manera precisa y exacta un nodo en la red a partir de otros nodos con posición conocida?

El objetivo de este trabajo consiste en evaluar el desempeño en términos de exactitud y precisión de técnicas de localización libres de distancia y basadas en distancia mediante el indicador de la fuerza de la señal recibida (RSSI - Received Signal Strength Indicator); variando el número de nodos de referencia y el nivel de ruido.

Las técnicas de localización analizadas en este trabajo, utilizan la información de la distancia entre el NOI y los nodos de referencia, así como la posición de dichos nodos de referencia para estimar la posición del NOI. La distancia puede obtenerse mediante técnicas de estimación de distancia, tales como RSSI, el tiempo de llegada (ToA - Time of Arrival), diferencia de tiempo de llegada (TDoA - Time Difference of Arrival) o el ángulo de llegada (AoA - Angle of Arrival), entre otros [5]. El RSSI es una métrica utilizada para obtener la potencia de la señal recibida en una WSN. Esta técnica se emplea en localización y posicionamiento de objetos debido a su bajo costo y facilidad de implementación [3]. A pesar de su utilidad, el RSSI en la localización presenta varias limitaciones: el fenómeno multitrayectoria, interferencias y condiciones ambientales [6]. El ToA no requiere hardware adicional, pero, su precisión depende en gran medida de la sincronización de los nodos, lo que representa un reto considerable en una WSN. La técnica TDoA, a pesar de su precisión en entornos controlados, presenta una limitación en la distancia máxima de trabajo por

la propagación del ultrasonido, lo que reduce su aplicabilidad en áreas de gran extensión [7]. Con respecto a la técnica AoA, las antenas de los sensores miden el ángulo de arribo para la estimación de ubicación de un objeto. Sin embargo, este método requiere hardware adicional costoso, lo que limita su uso en WSNs [8]. El RSSI es la técnica con menor costo computacional, pero, más imprecisa en la localización del NOI, debido a que este método es el más susceptible al ruido e interferencias que las técnicas ToA, TDoA y AoA [9].

En este trabajo se evalúan técnicas de localización libres de distancia tales como centroide (CL), centroide ponderado (WCL), centroide ponderado de lapso relativo (RWL) y centroide ponderado exponencial de lapso relativo (REWL), y técnicas basadas en distancia: algoritmo hiperbólico (HL) y algoritmo hiperbólico ponderado (WHL). Estas técnicas emplean el RSSI para estimar la posición del NOI, debido a su bajo costo e implementación sencilla en hardware. En la [Tabla I](#), se presenta un breve análisis matemático de las técnicas de localización analizadas en este trabajo.

TABLA I. TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN ANALIZADAS.

Centroide (CL)	Estima la posición del NOI mediante el promedio de las posiciones de los nodos de referencia. El desempeño de este algoritmo no se ve afectado por el ruido del ambiente de localización [10]. El centroide $(\hat{x}, \hat{y})$ se obtiene mediante la siguiente ecuación $\hat{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \hat{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$
Centroide ponderado (WCL)	En este algoritmo, la posición del NOI se obtiene mediante el centroide ponderado, donde la ponderación se determina mediante la expresión $\omega_i = 1/d_i^g$, donde $g = 2$ y d_i es la distancia entre el NOI y el nodo de referencia i-th [10]. El centroide ponderado $(\hat{x}, \hat{y})$ se obtiene mediante la siguiente ecuación $\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i x_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i}, \hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i y_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i}$
Centroide RWL y REWL	Estos algoritmos calculan el centroide ponderado del NOI. El centroide RWL considera que la ponderación se asume como una relación lineal de las mediciones del RSSI de cada nodo de referencia al NOI. En el centroide REWL, la ponderación incrementa exponencialmente con la medición del RSSI de cada nodo de referencia al NOI [10]. La ponderación ω_i del centroide RWL se obtiene mediante $\omega_i = (v_i - v_{\min})/v_{\Delta}$, donde $v_{\Delta} = v_{\max} - v_{\min}$. La ponderación ω_i del centroide REWL se obtiene mediante $\omega_i = (1 - \lambda)^{v_{\max} - v_i}$.
Algoritmo Hiperbólico (HL)	Este método estima la posición $\hat{\mathbf{p}} = [\hat{x}, \hat{y}]^T$ del NOI, empleando un estimador por mínimos cuadrados. Sin embargo, este método es muy susceptible a la imprecisión en la localización del NOI, debido a la incertidumbre y ambigüedad de la información [11]. La posición $\hat{\mathbf{p}}$ del NOI se obtiene mediante la expresión $\hat{\mathbf{p}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{b}$.
Algoritmo Hiperbólico ponderado (WHL)	Este método emplea un estimador por mínimos cuadrados ponderados, el cual mejora la precisión de la localización del NOI, empleando una matriz de covarianza $\mathbf{S}$ con información del nivel de ruido en el ambiente de localización [11]. La posición $\hat{\mathbf{p}}$ del NOI se obtiene mediante la ecuación $\hat{\mathbf{p}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{S}^{-1} \mathbf{b}$.

En una investigación realizada en [12], se obtiene que el algoritmo de optimización Gray Wolf (GWO) mejorado obtiene un error de localización por debajo de 0.18 m en diferentes escenarios. Por lo que este algoritmo presenta mejor desempeño en cuanto al error de localización que el método tradicional GWO, PSO, DV-Hop y DV-Hop mejorado. En [13] se comparan diversas técnicas de localización con 4 nodos de referencia ubicados en las esquinas del área de sensado. Los resultados obtenidos muestran que el algoritmo de localización de trilateración presenta mejor desempeño en términos del error de localización que los métodos de triangulación y min-max considerando un ambiente exterior. Sin embargo, [14] considera un escenario en 3D con obstáculos sobre un área de sensado de $100 \times 100 \times 20 \text{ m}^3$ considerando 4 nodos de referencia, en el cual el protocolo de localización propuesto alcanza un error de localización en el rango de 0 – 10 m, cual es menor con respecto al método NDEMDS, que presenta mayor variación de error de localización. El autor en [15] presenta un sistema eficiente de localización por huellas dactilares basado en WSN para interiores, basado en una arquitectura de sensores de bajo costo. Este sistema se basa en el establecimiento de un conjunto de datos de huellas dactilares para interiores y la adopción de cuatro modelos de aprendizaje automático (ML). El sistema propuesto se validó mediante experimentos reales realizados en interiores complejos con diversos obstáculos y paredes, y alcanza una precisión de localización eficiente con un promedio de 1.4 m.

II. DESARROLLO

El desempeño en términos de exactitud y precisión de las técnicas de localización libres y basadas en distancia analizadas en una red a un simple salto. La exactitud se determina mediante el error de localización promedio (ALE – Average Localization Error) [16] dado en la [Ec. \(1\)](#).

$$\text{ALE} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sqrt{(x_k - \tilde{x}_k)^2 + (y_k - \tilde{y}_k)^2} \quad (1)$$

Donde K es el número de iteraciones, las coordenadas (x_k, y_k) representa posición real del NOI, y las coordenadas $(\tilde{x}_k, \tilde{y}_k)$ es la posición estimada del NOI en la iteración k . La precisión se obtiene mediante la función de distribución de probabilidad acumulada (CDF – cumulative distribution function). La CDF se obtiene mediante una función de distribución gaussiana, la cual requiere los parámetros de media y desviación estándar para poder estimar el comportamiento de la CDF de la técnica de localización evaluada. Los parámetros de media y desviación estándar se obtienen mediante las muestras de los errores de localización obtenidos en 10,000 iteraciones, por lo que se obtienen 10,000 datos de errores de localización acorde al experimento realizado y con esta información se calcula la media y desviación estándar de dichos datos. La precisión se

define como la probabilidad de encontrar el NOI con cierto error de localización [17].

Las técnicas de localización analizadas, se evalúan en un área de sensado de 100 m x 100 m, considerando 10,000 iteraciones, donde en cada iteración se genera el NOI con posición aleatoria y su posición estimada es determinada mediante alguna técnica de localización considerando el RSSI y la posición de los nodos de referencia. Las métricas de desempeño de exactitud y precisión de las técnicas de localización analizadas fueron obtenidas variando el nivel de ruido y el número de nodos de referencia. En la [Tabla II](#), se muestran los parámetros de simulación de las técnicas de localización analizadas.

TABLA II. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN.

Parámetros	Valor
Área de sensado	100 m x 100 m
Número de nodos de referencia	3 – 9 nodos
Parámetros de potencia	$A = -65.39 \text{ dBm}$, $\eta = 3.873$
Nivel de ruido	2 – 10 dB
Iteraciones	10,000

A. CARACTERIZACIÓN DEL RSSI

Para obtener un modelo representativo del comportamiento de la señal RSSI en un entorno experimental, se llevó a cabo una caracterización detallada de este parámetro en un área de interés de 11 m x 11 m, donde se colocaron cuatro nodos de referencia o nodos transmisores, utilizando módulos inalámbricos SX1278 LoRa. Los nodos de referencia se posicionaron en las esquinas del área de interés, cuyas posiciones fueron definidas como (0,0), (11,0), (0,11) y (11,11). En la [Fig. 1](#) se muestra el área de interés con los cuatro nodos de referencia colocados en las esquinas y los puntos de muestreo, donde el nodo receptor toma la medición del RSSI promedio. El receptor ubicado en cada punto de muestreo del grid o rejilla recibe 100 paquetes por cada nodo de referencia, lo que da un total de hasta 400 mediciones de RSSI por cada punto de muestreo del grid o rejilla.

Estas mediciones permitieron construir una matriz de datos que relaciona el RSSI con la distancia, lo que es esencial para la implementación y evaluación posterior de las técnicas de localización analizadas. En la [Fig. 2](#) se muestra un mapa de mediciones del RSSI con respecto al nodo de referencia R_1 , donde dichos valores de RSSI fueron obtenidos después de filtrar las 100 muestras obtenidas en cada punto de muestreo del grid de la [Fig. 1](#). Se utilizó el filtro de Kalman para obtener un valor de RSSI suavizado del ruido inherente del canal de comunicaciones. En el mapa de mediciones de RSSI se observa que entre más cerca está el receptor del nodo de referencia R_1 , mayor es el nivel de potencia recibida o RSSI dado en *dBm*.

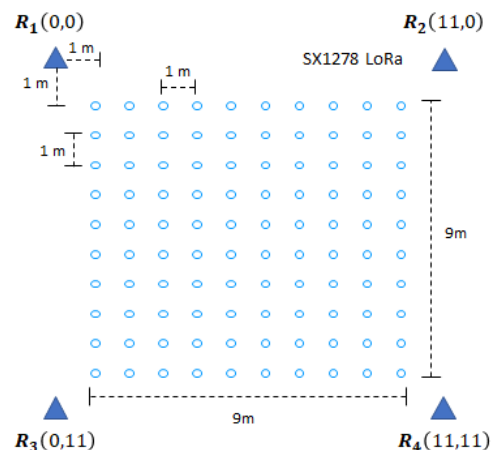


Fig. 1. Escenario de caracterización del RSSI.

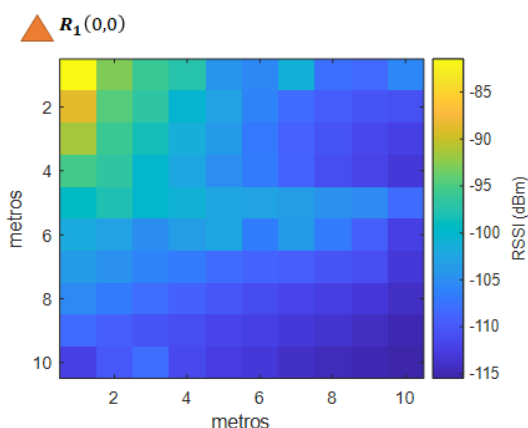


Fig. 2. Mediciones reales del RSSI en cada punto de muestreo del grid con respecto al nodo de referencia R_1 con posición (0,0).

En la [Fig. 3](#), se muestra el modelo de propagación obtenido tomando en cuenta todas las mediciones de RSSI realizadas con respecto a los cuatro nodos de referencia. La curva de color azul representa el comportamiento del RSSI (*dBm*) con respecto a la distancia entre el nodo receptor y el nodo de referencia.

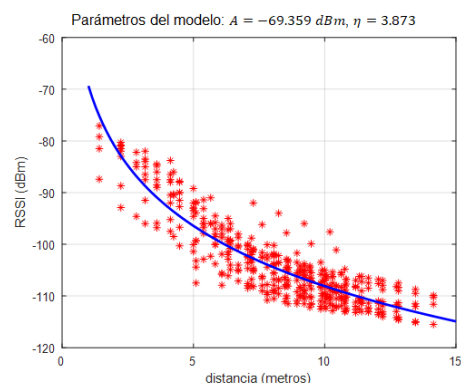


Fig. 3. Modelo de propagación de las mediciones reales del RSSI.

Esta curva se obtiene mediante la interpolación de las muestras de RSSI, es decir, con las mediciones de RSSI tomadas, se obtienen los parámetros del exponente de pérdidas $\eta = 3.873$ y la potencia recibida a una distancia de referencia d_0 , cuyo valor es $A = -69.359 \text{ dBm}$, del modelo log-normal shadowing.

El modelo log-normal shadowing es el modelo más comúnmente utilizado para estimar la relación entre la potencia recibida (RSSI) y la distancia entre el emisor y el receptor en entornos inalámbricos. Se expresa mediante la Ec. (2).

$$P_r(d) = P_T + A - 10\eta \log(d) + X_\sigma \quad (2)$$

Donde: $P_r(d)$ es la potencia recibida a una distancia d . P_T es la potencia transmitida en dBm . El parámetro A es la potencia recibida a una distancia de referencia d_0 , donde $d_0 = 1\text{m}$. η es el exponente de pérdidas por trayectoria cuyos valores típicos están en el rango de 1.5 a 5. X_σ es una variable aleatoria que modela el ruido e interferencias. La variable aleatoria X_σ es del tipo normal con media cero y desviación estándar σ en dB. Los valores típicos de la desviación estándar σ están en el rango de 4 a 12 dB [10].

B. EXACTITUD DE LAS TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN

A continuación, se presentan resultados de las técnicas de localización analizadas en términos de la exactitud, la cual se determina mediante el error de localización promedio (ALE) expresado en metros.

1. ALE vs. nivel de ruido.

En esta sección se presenta el ALE de las técnicas de localización analizadas variando el nivel de ruido de 2 a 10 dB. Se observa que conforme aumenta el valor del nivel de ruido, las técnicas de localización analizadas presentan un aumento del ALE. En la Fig. 4 se observa que, para niveles bajos de ruido, las técnicas basadas en distancia hiperbólico (HL) e hiperbólico ponderado (WHL) presentan menor ALE que las técnicas libres de distancia: CL, WCL, RWL y REWL. Sin embargo, para niveles altos de ruido, las técnicas de localización libres de distancia, muestran mayor robustez en el comportamiento del ALE conforme aumenta el nivel de ruido, principalmente esto se observa en el algoritmo de centroide CL, cuyo desempeño no es afectado por el ruido e interferencias del canal de comunicaciones. Además, se observa que, para una red con 3 nodos de referencia siempre fijos, las técnicas de localización basadas en distancia HL y WHL presentan una curva similar del ALE.

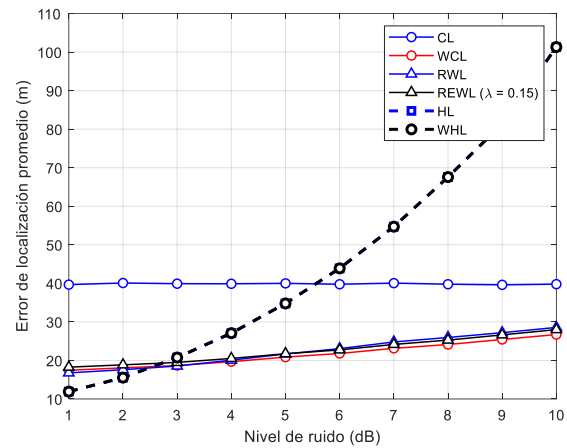


Fig. 4. ALE vs. nivel de ruido en dB para 3 nodos de referencia.

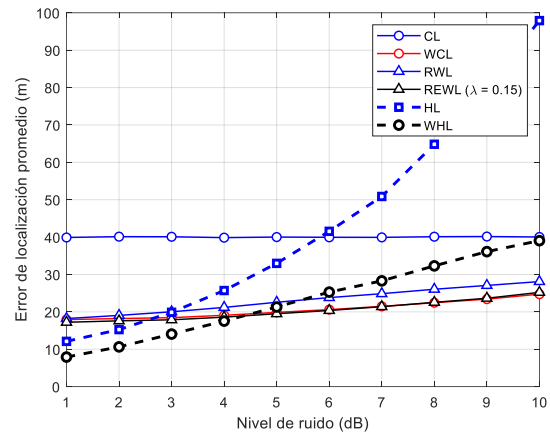


Fig. 5. ALE vs. nivel de ruido en dB para 5 nodos de referencia.

En la Fig. 4, las técnicas de localización HL y WHL presentan la misma gráfica de exactitud para 3 nodos de referencia, esto es debido a que los 3 nodos de referencia siempre se encuentran distribuidos en el área de sensado con posiciones fijas y, por lo tanto, se obtienen distancias similares desde el NOI con respecto a los nodos de referencia, por lo que ambos algoritmos HL y WHL presentan la misma gráfica de exactitud, sólo para este caso. En la Fig. 5 se muestra una mejora en el desempeño de las técnicas de localización analizadas, ya que se estima la posición del NOI al tomar en cuenta 5 nodos de referencia. Esta mejora significativa se debe principalmente debido a que mayor número de nodos de referencia, mayor es la información de las distancias entre el NOI y sus respectivos nodos de referencia. Una mejora significativa del ALE del algoritmo hiperbólico ponderado (WHL) conforme aumenta el nivel de ruido, puede ser apreciada en la Fig. 5.

La Fig. 6, muestra el comportamiento del ALE para 7 nodos de referencia. Se observa que para niveles bajos de ruido, el algoritmo WHL presenta el mejor desempeño en términos del ALE que los demás algoritmos analizados. Por otro lado, conforme varía el nivel de ruido, los algoritmos de centroide WCL y REWL obtienen una curva de ALE muy similar.

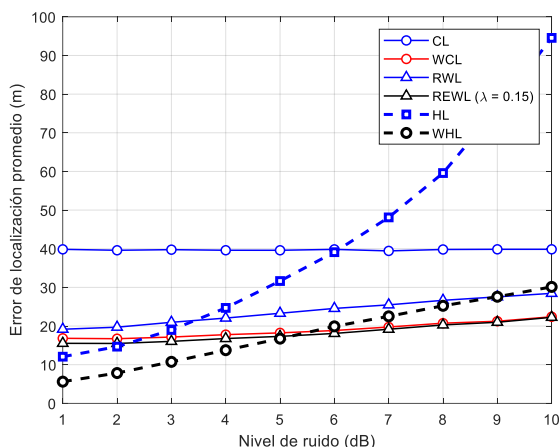


Fig. 6. ALE vs. nivel de ruido en dB para 7 nodos de referencia.

En la Fig. 7, se observa una reducción del ALE de las técnicas de localización analizadas al aumentar el número de nodos de referencia de 7 a 9 nodos. Considerando 9 nodos de referencia para un nivel de ruido del 10 dB, el algoritmo WHL disminuye ligeramente su valor del ALE.

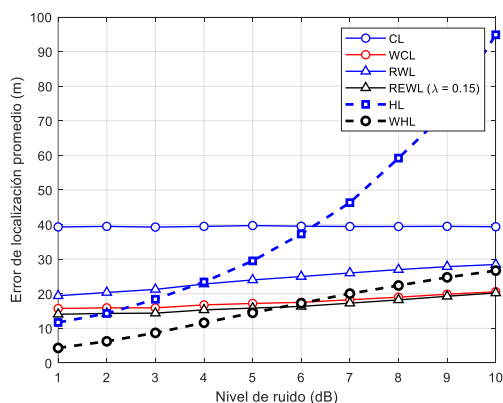


Fig. 7. ALE vs. nivel de ruido en dB para 9 nodos de referencia.

2. ALE vs. número de nodos de referencia.

En esta sección, se presentan resultados de las técnicas de localización analizadas en términos del ALE en metros, variando el número de nodos de referencia desde tres nodos hasta obtener una red con 9 nodos. Se observa que, al aumentar la cantidad de nodos de referencia, disminuye el ALE de las técnicas de localización analizadas.

En la Fig. 8 se muestra el ALE de las técnicas de localización analizadas para nivel de ruido de 4 y 10 dB, donde a mayor nivel de ruido, se obtiene un aumento del ALE de las técnicas de localización analizadas, lo cual se muestra en la Fig. 8 (b). Para nivel bajos de ruido de 4 dB, el algoritmo WHL presenta menor ALE que las demás técnicas de localización analizadas, esto conforme aumenta el número de nodos de referencia (ver Fig. 8 (a)). Sin embargo, para niveles alto de ruido de 10 dB, los algoritmos de centroide WCL y REWL presenta el mejor desempeño en términos del ALE, lo cual se aprecia en la Fig. 8 (b).

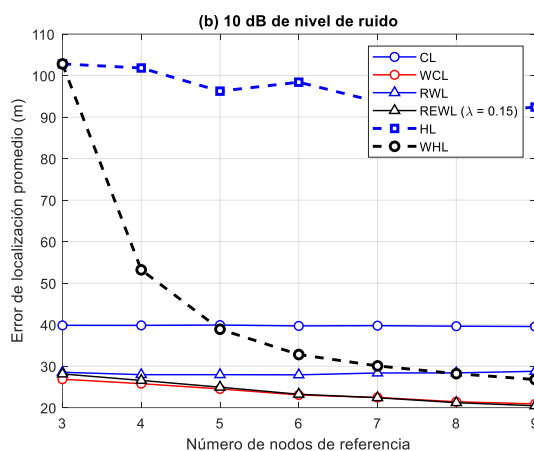
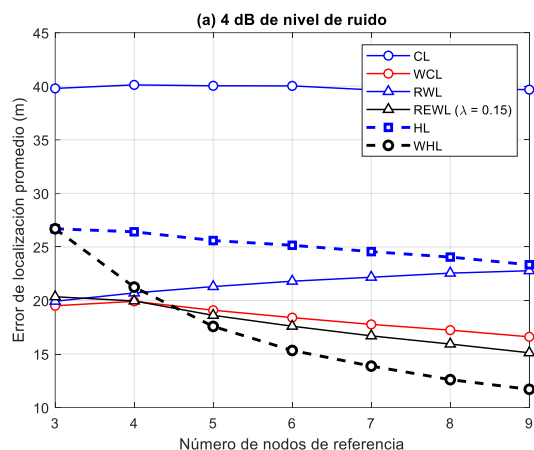


Fig. 8. ALE vs. número de nodos de referencia para nivel de ruido de (a) 4 dB y (b) 10 dB.

En la Tabla III se muestra un análisis comparativo de las técnicas de localización analizadas, para diferentes niveles de ruido de 1, 4 y 7 dB considerando una red con 5 y 7 nodos de referencia.

TABLA III. EXACTITUD DE LAS TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN ANALIZADAS.

Algoritmo	5 nodos de referencia			7 nodos de referencia		
	Nivel de ruido en dB			Nivel de ruido en dB		
	1	4	7	1	4	7
CL	39.9 3	39.8 3	39.8 8	39.7 5	40.0 7	39.8 6
WCL	17.8 6	18.9 3	21.5 4	16.8 2	17.7 6	19.7 5
RWL	18.1 5	21.0 1	25.0 1	19.0 4	22.2 5	25.6 9
REWL	17.1 3	18.5 0	21.5 0	15.5 5	16.6 7	19.1 0
HL	12.0 6	25.7 0	50.6 9	12.0 1	24.5 6	49.8 0
WHL	7.88	17.6 4	28.5 4	5.63	13.7 8	22.6 5

Como se observa en la Tabla III, a medida que aumenta el nivel de ruido, aumenta el error de localización de las técnicas de localización evaluadas. Sin embargo, para una red

con 7 nodos de referencia, disminuye el error de localización de las técnicas de localización analizadas en comparación con la red de 5 nodos de referencia.

C. PRECISIÓN DE LAS TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN

En esta sección, se presentan resultados de las técnicas de localización analizadas en términos de la precisión. La precisión se presenta mediante la función de distribución de probabilidad acumulada (CDF). La precisión representa la probabilidad de que un nodo en la red sea localizado debajo de cierto error de localización. En la Fig. 9 (a), para una red con 3 RNs, se observa que los algoritmos de centroide WCL y REWL tienen una curva de precisión muy similar. En la Fig. 9 (b), para el caso de una red con 5 RNs se obtiene que la precisión del algoritmo WHL para un error de localización de 20 m es del 60% aproximadamente, es decir, existe un 60% de probabilidad de que algoritmo WHL determine la posición del NOI con un error de localización menor a 20 m. Sin embargo, el algoritmo HL presenta una precisión del 40% con un error de localización de 20 m.

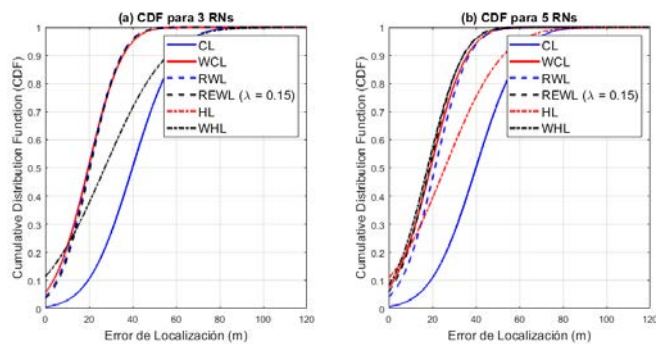


Fig. 9. CDF de las técnicas de localización para nivel de ruido de 4 dB considerando (a) 3 RNs y (b) 5 RNs.

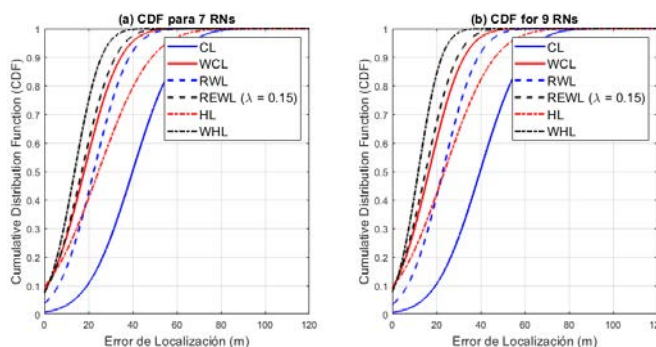


Fig. 10. CDF de las técnicas de localización para nivel de ruido de 4 dB considerando (a) 7 RNs y (b) 9 RNs.

En las Fig. 10 (a) y Fig. 10 (b), considerando una red de 7 y 9 nodos de referencia respectivamente, el algoritmo WHL muestra una precisión del 75% y 85% respectivamente, para un error de localización de 20 m.

En la Fig. 11, se muestra la precisión de las técnicas de localización analizadas, para un nivel de ruido de 10 dB. Las

técnicas basadas en distancia HL y WHL presentan una curva de muy baja precisión en la localización del NOI para 3 nodos de referencia, lo cual se aprecia en la Fig. 11 (a). En la Fig. 11 (b), se muestra una mejora significativa de la curva de precisión del algoritmo WHL. Sin embargo, esta mejora del algoritmo WHL en cuanto a su curva de precisión, resalta en mayor medida a partir de una red con 7 nodos de referencia como se muestra en la Fig. 12 (a). La Fig. 12 (b), muestra que, para una red con 9 nodos de referencia, el algoritmo WHL solamente presenta una precisión del 35% con un error de localización de 20m, lo cual implica una baja precisión. Pero esta precisión del algoritmo WHL tiende a aumentar significativamente para un error de localización de 40 m, mostrando dicho algoritmo una precisión del 80%.

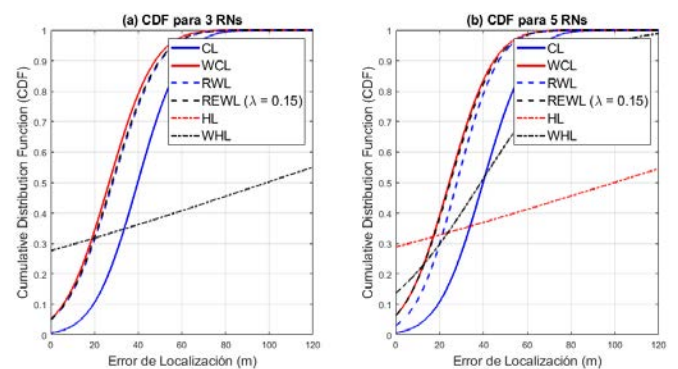


Fig. 11. CDF de las técnicas de localización para nivel de ruido de 10 dB considerando (a) 3 RNs y (b) 5 RNs.

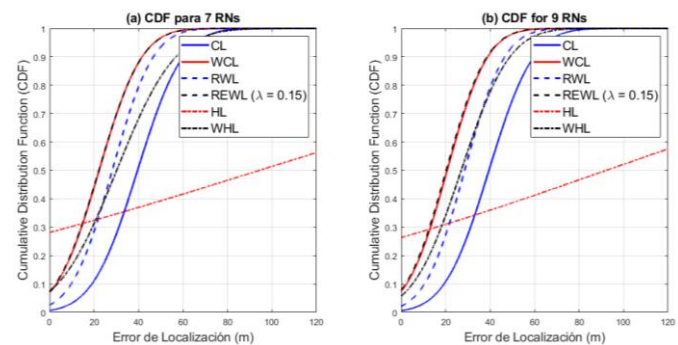


Fig. 12. CDF de las técnicas de localización para nivel de ruido de 10 dB considerando (a) 7 RNs y (b) 9 RNs.

En la Tabla IV se muestra un análisis comparativo de la precisión de las técnicas de localización analizadas en términos de la precisión de localización del NOI, para diferentes errores de localización tales como 10 m, 20 m, 40 m, 70 m y 100 m, considerando un nivel de ruido de 4 dB y una red con 5 y 7 nodos de referencia.

TABLA IIIV. PRECISIÓN DE LAS TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN ANALIZADAS PARA UN NIVEL DE RUIDO DE 4 DB.

5 nodos de referencia		Error de localización (m) para un nivel de ruido de 4 dB.				
Algoritmo		10 m	20 m	40 m	70 m	100 m
CL		0.0337	0.1116	0.5022	0.9672	0.9999
WCL		0.2425	0.5266	0.9448	1	1
RWL		0.1783	0.46	0.9385	1	1
REWL		0.2355	0.5455	0.9628	1	1
HL		0.2218	0.392	0.761	0.9856	0.9999
WHL		0.2677	0.5689	0.9608	1	1
7 nodos de referencia		Error de localización (m) para un nivel de ruido de 4 dB.				
Algoritmo		10 m	20 m	40 m	70 m	100 m
CL		0.0316	0.1081	0.5016	0.9689	0.9999
WCL		0.2768	0.5658	0.9537	1	1
RWL		0.1668	0.4298	0.9198	0.9999	1
REWL		0.2853	0.6056	0.9737	1	1
HL		0.2211	0.4033	0.7889	0.9912	1
WHL		0.3419	0.7202	0.9948	1	1

Como se observa en la [Tabla IV](#), a medida que aumenta el error de localización, aumenta la precisión de las técnicas de localización analizadas. Esto se observa en la red de 5 y 7 nodos de referencia. Para una red con 5 nodos de referencia, se observa que el algoritmo WHL es el más preciso ya que tiene una precisión de 26.77 % de detectar al NOI con un error de localización de 10 m. Por ejemplo, el algoritmo WHL obtiene una precisión del 56.89 % y 96.08 % de localizar al NOI para un error de localización de 20 m y 40 m respectivamente, donde estos valores de precisión de localizar al NOI son mayores que los demás algoritmos mostrados en la [Tabla IV](#). Similarmente, se aprecia que el algoritmo WHL es la técnica de localización más precisa en la estimación del NOI para una red de 7 nodos de referencia con los errores de localización dados en la [Tabla IV](#).

Los resultados obtenidos, muestran que el algoritmo WHL presenta mayor exactitud y precisión que las demás técnicas de localización analizadas, para una red con bajos niveles de ruido. Sin embargo, en una red con altos niveles de ruido, los algoritmos de centroe WCL y REWL presentan el mejor desempeño en términos de exactitud y precisión.

III. CONCLUSIONES

En la realización de este trabajo, se evaluó el desempeño en el escenario a un solo salto de las técnicas de localización analizadas en términos de exactitud y precisión, variando el nivel de ruido y el número de nodos de referencia. Se obtuvo que el algoritmo WHL presentó el mejor desempeño en términos de la exactitud y precisión comparado con el resto de las técnicas analizadas para ambientes con bajo nivel de ruido. Como trabajo futuro, se debe determinar la exactitud

y precisión de las técnicas de localización analizadas con errores reales en la estimación de la posición del NOI.

REFERENCIAS

- [1] K. Reddy Madhavi, Mohd Nasrun Mohd Nawi, B. Bhaskar Reddy, K. Baboji, Kakarla Hari Kishore and S.V. Manikanthan, "Energy efficient target tracking in wireless sensor network using PF-SVM (particle filter-support vector machine) technique," *Measurement: Sensors*. vol. 26, 2023.
- [2] Satish R. Jondhale, R. Maheswar and Jaime Lloret, "Target Localization and Tracking Using WSN," in *Received Signal Strength Based Target Localization and Tracking Using Wireless Sensor Networks*. Springer, 2021, ch. 2, pp. 21-48.
- [3] Y. J. A. Hashim and S. T. Hasson, "A Proposed Approach to Improve the WSN Performance Based on LEACH Algorithm," *2024 IEEE 10th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*, Bandung, Indonesia, pp. 168-173, 2024.
- [4] Kamal Gulati, Raja Sarath Kumar Boddu, Dhiraj Kapila, Sunil L. Bangare, Neeraj Chandnani and G. Saravanan, "A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT)," *materialstoday: proceedings*. vol. 51, pp. 161-165, 2022.
- [5] J. Mass-Sanchez, C. Vargas-Rosales, E. Ruiz-Ibarra, A. Espinoza-Ruiz, J. Vazquez-Castillo and A. Garcia-Berumen, "Weighted Multilateration Algorithm With a Correcting Factor for Mobile Wireless Sensor Networks," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 161937-161958, 2021.
- [6] Chuku, N.; Nasipuri, A., "RSSI-Based Localization Schemes for Wireless Sensor Networks Using Outlier Detection," *J. Sens. Actuator Netw.* vol. 10, no. 1, pp. 22, 2021.
- [7] Ito T, Anzai D, Jianqing Wang. Novel joint TOA/RSSI-based WCE location tracking method without prior knowledge of biological human body tissues. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2014;2014:6993-6.
- [8] Javed I., Tang X., Shaukat K., Sarwar M. U., Alam T. M., Hameed I. A., and Saleem M. A., "V2X-Based Mobile Localization in 3D Wireless Sensor Network," *Security and Communication Networks*, vol. 2021, pp. 13, 2021.
- [9] Mass S. J., Vargas R. C., Ruiz I. E., Garcia B. A., and Espinoza R. A., "Localization based on probabilistic multilateration approach for mobile wireless sensor networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 54994-55011, 2020.
- [10] Vargas-Rosales C, Mass-Sanchez J, Ruiz-Ibarra E, Torres-Roman D, Espinoza-Ruiz A. Performance Evaluation of Localization Algorithms for WSNs. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. vol. 11, no. 3, 2015.
- [11] Mass-Sanchez, J., Ruiz-Ibarra, E., Cortez-González, J. *et al.* Weighted Hyperbolic DV-Hop Positioning Node Localization Algorithm in WSNs. *Wireless Pers Commun.* vol. 96, pp. 5011-5033, 2017.
- [12] Z. Xu, Wireless Sensor Network Localization Incorporating Gray Wolf Optimization and DV-Hop Algorithm, in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 168594-168606, 2024.
- [13] D'Arienzo M. An Experimental Comparison of Basic Device Localization Systems in Wireless Sensor Networks. *Network*. vol. 5, no. 2, 2025.
- [14] Prabhat Kumar, Sneha Mishra, Surjit Singh, Srete Nikolovski, Mohamed Louzazni, Localization in 3D Wireless Sensor Networks with Obstacle Consideration, *Journal of Sensors*, 2024.
- [15] Alhmiedat T. Fingerprint-Based Localization Approach for WSN Using Machine Learning Models. *Applied Sciences*. vol. 13, no. 5, 2023.
- [16] A. Singh, V. Kotiyal, S. Sharma, J. Nagar and C. -C. Lee, "A Machine Learning Approach to Predict the Average Localization Error With Applications to Wireless Sensor Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 208253-208263, 2020.
- [17] Mass-Sanchez, J.; Ruiz-Ibarra, E.; Gonzalez-Sanchez, A.; Espinoza-Ruiz, A.; Cortez-Gonzalez, J. Factorial Design Analysis for Localization Algorithms. *Appl. Sci.* vol. 8, no. 12, 2018.

BIOGRAFÍAS



JOAQUÍN MASS SANCHEZ Recibió el grado de ingeniero en electrónica por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON, 2011) y el grado de maestría por el Centro de Investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN, 2014). En 2020 recibió el grado de doctor en ciencias de la ingeniería (ITSON, 2020). Sus temas de interés incluyen localización en redes de sensores inalámbricos, redes ad-hoc móviles, movilidad, modelado estocástico, aplicaciones de procesamiento de señales digitales y comunicaciones digitales.



ERICA RUIZ IBARRA Recibió los grados de maestría y doctorado en electrónica y telecomunicaciones por el centro de investigación CICESE en México en el 2000 y 2010 respectivamente. Actualmente es profesor investigador en el departamento de ingeniería eléctrica y electrónica en el Instituto Tecnológico de Sonora. Sus líneas de investigación incluyen redes de sensores inalámbricos, diseño y evaluación de desempeño de protocolos de

enrutamiento, comunicaciones digitales y sistemas de interacción humano-máquina.



ADOLFO ESPINOZA RUIZ Obtuvo su maestría en Ciencias de la Computación en el ITESM campus Estado de México en 2003. Actualmente es profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en el Instituto Tecnológico de Sonora. Sus intereses de docencia e investigación incluyen sistemas embebidos, computación blanda y redes de sensores inalámbricos.



ARMANDO GARCÍA BERUMEN Profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) desde 1999. Obtuvo su licenciatura en Ingeniería Electrónica en 1995 en el Instituto Tecnológico de Durango. En 1998, obtuvo una maestría con énfasis en Telecomunicaciones en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y su doctorado en Tecnologías

de la Información y las Telecomunicaciones en 2009 en Telecom SudParis (anteriormente Instituto Nacional de Telecomunicaciones) en Évry, Francia. Cuenta con diversas publicaciones en congresos nacionales e internacionales. Sus líneas de investigación son las redes inalámbricas, IoT y los sistemas embebidos.



ADOLFO SOTO COTA (S'02–M'08) nació en 1972. Obtuvo la maestría y el doctorado en control automático en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), Guadalajara, México, en 2000 y 2004, respectivamente. De 1995 a 1997, trabajó en Sony, Tijuana, México. Desde agosto de 1999, trabaja en el Instituto Tecnológico de Sonora,

Obregón, México como profesor de tiempo completo. Sus intereses de investigación incluyen sistemas de estructura variable con modos deslizantes, perturbaciones singulares, accionamientos eléctricos, maquinaria eléctrica y control de sistemas de potencia.

App de Vinculación entre Académicos y Empresarios Desarrollada en "Google Flutter"

SALVADOR PÉREZ MARTÍNEZ¹, GEOVANNI HERNANDEZ GOMEZ¹, PAULA CONCEPCIÓN ISIORDIA LACHICA^{1, 2}, EDUARDO CABAL YEPEZ¹

¹Universidad de Guanajuato, DEM Yuriria.

²Universidad de Guanajuato DICIVA.

sperezmartinez@ugto.mx

geov.hernandez@ugto.mx

pc.isiordia@ugto.mx

educabal@ugto.mx

RESUMEN Este trabajo presenta el desarrollo de una aplicación móvil innovadora diseñada para fomentar y fortalecer la vinculación entre el sector académico y el empresarial, además de dar solución a desafíos reales y acortar la brecha que existe en este tipo de vinculación. Para acortar esta brecha, se propone una solución digital que aprovecha la presencia de las aplicaciones móviles en el día a día de los usuarios incorporando funcionalidades clave inspiradas en modelos de interacción digital, como los perfiles personalizados, sistema de interacción social basado en "me gusta" y favoritos, un sistema de "emparejamiento" que facilita la conexión por intereses comunes basado en un sistema de filtros que el usuario configura de manera manual y un módulo de chat integrado para la comunicación directa. El objetivo es agilizar la identificación de colaboradores y la realización de proyectos conjuntos.

PALABRAS CLAVE— Aplicación móvil, vinculación Academia-Empresa, Google Flutter.

I. INTRODUCCIÓN

La vinculación entre la academia y la empresa es la colaboración entre universidades y el sector productivo donde la academia aporta investigación, ideas nuevas y talento, mientras que las empresas ofrecen recursos, infraestructura y oportunidades para aplicar ese conocimiento en el mundo real. Esta interacción se fundamenta en diversos modelos de innovación, como el Modo 2 [1] de producción del conocimiento, que enfatiza la generación de conocimiento en contextos de aplicación y la colaboración transdisciplinaria. También se apoya en el Modelo de la Triple Hélice [2], que describe la interacción entre la universidad, la industria y el gobierno como clave para el desarrollo innovador. Esta perspectiva ha evolucionado hacia el Modelo de la Hélice Cuádruple [3], que integra adicionalmente a la sociedad civil para un ecosistema de innovación más completo y socialmente responsable.

Transferir conocimiento, impulsar la innovación y resolver problemas reales mediante proyectos conjuntos, investigaciones aplicadas o desarrollo de tecnología. Según datos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) [4], actualmente llamada Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), en 2017, el 8.4% de las empresas en México participaron en proyectos de innovación en colaboración con instituciones de educación superior (IES) y centros públicos de investigación (CPI). En un entorno cada vez más competitivo y

globalizado, la colaboración entre el sector académico y el empresarial es clave para la generación de innovación, el desarrollo tecnológico y económico. Sin embargo, existen barreras como la falta de canales efectivos de comunicación y la dificultad para concretar oportunidades de colaboración. Por lo cual se propone desarrollar una aplicación móvil para acortar la brecha que existe entre la academia y el sector empresarial, facilitando la vinculación entre investigadores y empresarios a través de una plataforma intuitiva, accesible y fácil de usar. Para así al conectar la oferta y demanda de conocimiento, contribuir a la transferencia de tecnología, la creación de proyectos conjuntos y el fortalecer el ecosistema de innovación en general.

A. CONTEXTO DEL DESARROLLO DE APLICACIONES MÓVILES E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.

Hoy en día, las aplicaciones móviles han pasado a formar parte de la vida cotidiana de muchas personas y han tomado bastante relevancia en la forma en que nos comunicamos y nos relacionamos con los demás. Las utilizamos para casi todo: para hablar con amigos, pedir comida, buscar información, y mucho más. Han cambiado la manera cómo nos comunicamos, trabajamos y aprendemos [5]. Como cada vez hay más tipos de teléfonos y tabletas, necesitamos formas rápidas y eficientes de crear estas aplicaciones para que funcionen bien en todos ellos.

Para el desarrollo de esta aplicación, se adoptó la metodología Scrum [6, 7]. Esta se eligió por su enfoque ágil,

que permite trabajar en ciclos cortos y adaptativos, llamados "sprints". Esto es ideal para proyectos donde los requisitos pueden cambiar y donde es necesario obtener retroalimentación constante para mejorar. Scrum facilita la entrega de partes funcionales de la aplicación de manera regular, asegurando que el desarrollo esté siempre alineado con las necesidades de los usuarios.

Aquí es donde entra *Google Flutter* [8, 9], una herramienta de Google que ha cambiado drásticamente cómo se desarrollan las aplicaciones. La razón de su éxito es simple: permite a los programadores crear la misma aplicación para teléfonos Android y iOS usando una sola base de código. Lo cual se traduce en menos tiempo y dinero para desarrollar una app, y el resultado es una aplicación que funciona muy rápido y se ve muy bien en ambos tipos de dispositivos ya que funciona casi como una aplicación nativa desarrollada en cada sistema operativo. *Flutter* utiliza un lenguaje de programación llamado *Dart* [10], que está diseñado para que el proceso sea rápido y eficaz.

Las aplicaciones móviles son muy útiles para conectar a personas con fines profesionales o de colaboración. Un claro ejemplo de esto es LinkedIn, que ha transformado la forma en que los profesionales se conectan, buscan empleo e intercambian conocimientos. Al igual que las apps de citas como *Tinder* han demostrado lo bien que funciona la idea de hacer una conexión cuando dos personas tienen intereses en común [11]. Aunque esta aplicación tiene un objetivo muy diferente, la idea de encontrar intereses compartidos y permitir la comunicación directa a través de una conexión o emparejamiento es algo que podemos aplicar y hacer crecer en el mundo de la colaboración entre universitarios y empresas. Nuestra investigación busca tomar estos principios exitosos de conexión digital y aplicarlos para generar vínculos entre el sector académico y el empresarial, usando las ventajas de *Google Flutter* para crear una herramienta innovadora que impulse el intercambio de conocimientos y la creación de cosas valiosas para todos.

II. ESTADO DEL ARTE

El presente apartado revisa las soluciones existentes y los enfoques predominantes en la vinculación academia-empresa, así como en el ámbito de las plataformas digitales que facilitan la conexión entre individuos o la gestión del conocimiento. Este análisis permite identificar las brechas y justificar la propuesta de valor de la aplicación móvil desarrollada.

A. PLATAFORMAS DE VINCULACIÓN ACADEMIA-EMPRESA ESPECÍFICAS

Existen múltiples plataformas dedicadas a la vinculación entre universidades y empresas, las cuales suelen ser impulsadas por gobiernos, agencias de innovación o las propias instituciones educativas. Estas pueden presentarse como portales web de oficinas de transferencia de tecnología

(OTTs) universitarias, directorios de investigadores y sus capacidades, o plataformas nacionales de innovación. Por ejemplo, en México, el CONACyT (ahora SECIHTI) ha gestionado programas y plataformas para tal fin [4]. A nivel internacional, países como Alemania o Estados Unidos cuentan con ecosistemas más desarrollados y plataformas que buscan conectar startups, universidades e industria [2].

Sin embargo, muchas de estas plataformas suelen ser:

- Pasivas: Funcionan principalmente como repositorios de información, donde los usuarios deben buscar activamente sin un mecanismo de emparejamiento dinámico o visual.
- Locales o poco escalables: Enfocadas en una región o institución específica, limitando el alcance de las oportunidades.
- De baja usabilidad: Con interfaces complejas o desactualizadas que dificultan la experiencia del usuario y la adopción masiva.
- Orientadas a trámites formales: Requieren trámites extensos antes de la primera interacción, desincentivando el contacto inicial ágil.

B. REDES SOCIALES PROFESIONALES Y PLATAFORMAS DE EMPLEO

Las redes sociales profesionales y los portales de empleo han cambiado la forma en que nos conectamos con los demás y la forma en que buscamos oportunidades en el mercado laboral.

1. LinkedIn.

Es una red social profesional diseñada para conectar a profesionales de diversas industrias de todo el mundo, donde las empresas pueden encontrar talento, los profesionales pueden buscar empleo y los líderes pueden compartir sus conocimientos e ideas [12]. Su objetivo es facilitar la colaboración profesional, el desarrollo e impulso de carreras profesionales y la creación de oportunidades laborales. Funciona como un currículum digital interactivo que permite mostrar la experiencia, habilidades y logros de los usuarios.

Aunque permite visualizar perfiles académicos y empresariales, no está especializada en facilitar proyectos de vinculación ni en encontrar compatibilidades entre las necesidades del sector empresarial y la oferta de conocimiento de la academia. Se especializa en la búsqueda de talento para contratación directa.

2. Glassdoor y Computrabajo.

Estas plataformas están orientadas a la búsqueda de empleo, la publicación de vacantes y la revisión de empresas por parte de sus empleados [13]. Su propósito es conectar candidatos con puestos de trabajo, lo que difiere del objetivo de la aplicación propuesta, que es generar vinculación para investigación, desarrollo e innovación, no para la

contratación laboral directa. Su valor se centra en el reclutamiento y la transparencia de las condiciones laborales, no en la creación de colaboraciones estratégicas a nivel de proyectos.

C. PLATAFORMAS DE COMPARTICIÓN DE CONOCIMIENTO E INVESTIGACIÓN

1. ResearchGate y Academia.edu.

Son redes sociales académicas que permiten a los investigadores compartir sus investigaciones, publicaciones, resultados, desarrollos y conectarse con otros académicos para discutir trabajos [14]. Su característica principal es la difusión del conocimiento y la colaboración entre pares académicos. Sin embargo, no están diseñadas para conectar a investigadores con empresas que buscan soluciones a problemas industriales, ni ofrecen mecanismos para la gestión de proyectos de vinculación con el sector productivo.

2. Tinder y Bumble.

Estas aplicaciones han transformado la interacción social al introducir un mecanismo de "deslizar" y una conexión bidireccional [5, 11]. Su éxito radica en la simplicidad de la interacción, la rapidez de la respuesta y la generación de conexiones solo cuando existe un interés mutuo. Este modelo facilita la interacción inicial y genera un sentido de anticipación y recompensa.

La aplicación propuesta toma este principio de identificación de interés mutuo y lo aplica para el emparejamiento de perfiles académicos y empresariales basados en áreas de expertise, necesidades, intereses de investigación y proyectos específicos. La intuición y la eficiencia de este modelo de emparejamiento se trasladan al ámbito de la vinculación para agilizar la identificación de colaboradores y las oportunidades de proyectos.

Aunque el objetivo es completamente distinto (colaboración profesional vs. relación personal), la mecánica de la interacción para generar una conexión demostró ser altamente efectiva y adaptable a diversos contextos donde el interés mutuo es clave.

III. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN MOVIL

En esta fase se comenta el proceso de desarrollo de la aplicación móvil, el diseño, las funcionalidades y las características de esta que ayudan a la vinculación entre académicos y empresarios.

A. METODOLOGÍA DE DESARROLLO ADOPTADA

El proyecto se llevó a cabo utilizando una metodología de desarrollo ágil (Scrum) debido a la fácil adaptación de esta al proceso de diseño de interfaz de usuario (UI/UX) y la necesidad de realizar cambios constantes por la retroalimentación continua por parte de los *stakeholders*

(académicos y empresarios) durante el proceso del desarrollo. La implementación de *Sprints* de 2 a 4 semanas permitió la entrega de material de valor en cuanto a versiones funcionales o implementación de funcionalidades extra de manera regular, facilitando que se validaran y aceptaran funcionalidades clave como el sistema de "me gusta" y "favoritos" para guardar o señalar perfiles de su interés, el de "emparejamiento" para llevar a cabo la vinculación y las funcionalidades de comunicación. Esta adaptación de la metodología fue esencial para cumplir con los requisitos cambiantes y asegurar que el producto final funcione de la manera esperada y cumpla con las necesidades de los usuarios objetivo.

B. ARQUITECTURA DE LA APLICACIÓN

La aplicación se desarrolló siguiendo una arquitectura cliente-servidor para garantizar la escalabilidad, la seguridad de los datos y la gestión de la información.

- **Frontend (Cliente Móvil):** La interfaz de usuario de la aplicación, mostrada de en la Fig. 1 fue desarrollada utilizando Google *Flutter*. La elección de este *framework* se basó en su capacidad para ofrecer una experiencia de usuario nativa tanto en plataformas Android como iOS desde una única base de código, lo que optimizó los tiempos y costos de desarrollo. *Flutter* permitió la creación de una UI/UX intuitiva y atractiva, crucial para una aplicación que emula el modelo de las apps de citas, donde la interacción visual y la facilidad de uso son primordiales.



Fig. 1 Diseño de la interfaz de usuario.

- **Backend (servidor y base de datos):** El componente de servidor se implementó utilizando os *SDKs de Firebase* para *Flutter* y se desplegó en Google Cloud para la persistencia de los datos, se utilizó una base de datos *Cloud Firestore*. Esta configuración permitió almacenar de manera eficiente los perfiles de los usuarios, los detalles de los proyectos, las solicitudes de vinculación y el historial de chats, asegurando la integridad y disponibilidad de la información.

Funcionalidades clave implementadas, además de lo eficaz que resultó adaptarla al equipo de trabajo y los roles de los participantes del mismo.

El desarrollo se basó principalmente en la implementación de las siguientes funcionalidades:

- Creación y gestión de perfiles personalizados: Se habilitó la creación y edición de perfiles a través de la implementación de un formulario de registro como se muestra en la Fig. 2. Para los académicos esto incluye campos como institución de proveniencia, departamento, área de especialización, proyectos anteriores y publicaciones. Para empresarios, se permite la descripción de la empresa, sector, problemas/necesidades específicas e intereses de colaboración. Esta especificación en los perfiles es de suma importancia para la precisión del filtrado de perfiles para realizar la conexión ya que de ello depende poder encontrar una vinculación adecuada.

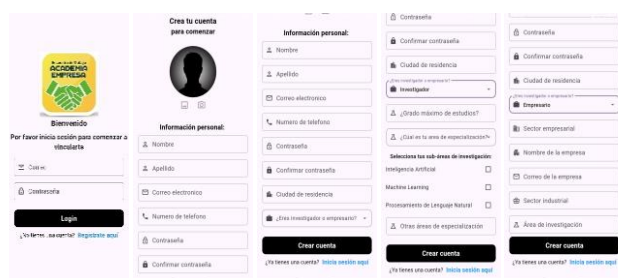


Fig. 2 Formulario de registro

- Sistema de interacción social basado en "me gusta" y favoritos: se implementó un mecanismo basado en el sistema de interacción de las redes sociales y las apps de citas, fácil de usar y de entender para demostrar interés y guardar perfiles para futuras interacciones. Los usuarios (tanto académicos como empresarios) pueden dar "me gusta" a los perfiles de otros usuarios que sean de su interés como se muestra en la Fig. 3. Un me gusta mutuo entre dos perfiles generará un emparejamiento y habilitará la posibilidad de comunicación directa entre ambas partes mediante un botón que da acceso a la función de chat de WhatsApp como se muestra en la Fig. 4. Además, los usuarios pueden marcar como favorito cualquier perfil o proyecto de interés, lo que permite organizar y acceder rápidamente a una lista de contactos o de oportunidades de vinculación sin necesidad de que el interés sea recíproco de inmediato. Este sistema de funcionamiento invita al usuario a hacer una exploración de la red de contactos, facilitando encontrar o identificar potenciales colaboradores.

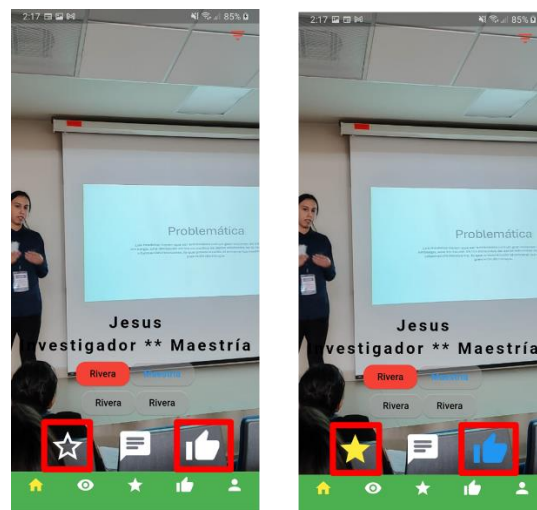


Fig. 3 Sistema de interacción social



Fig. 4 Módulo de chat integrado.

- Sistema de emparejamiento: Inspirado en las aplicaciones de citas, la aplicación muestra perfiles de académicos a empresarios y viceversa, basándose en un filtro manual de palabras clave, áreas de interés, necesidades y experiencia. Este sistema permite a los usuarios enviar "solicitudes de vinculación" a perfiles de interés y recibir solicitudes, agilizando el proceso de identificación de colaboradores potenciales.
- Módulo de chat integrado: Una vez que una solicitud de vinculación es aceptada por ambas partes, se habilita la opción de iniciar un chat privado entre el investigador y el empresario. Esta funcionalidad facilita la comunicación directa y en tiempo real, permitiendo discusiones iniciales sobre ideas de proyectos, viabilidad de soluciones y acuerdos de colaboración.
- Publicación y Gestión de Proyectos/Necesidades: Los empresarios pueden crear y compartir descripciones de problemas o proyectos específicos que requieren de *expertise* académico. La plataforma permite la categorización y etiquetado de estos

proyectos, haciéndolos detectables para los investigadores interesados.

- Sistema de Notificaciones: Se integró sistema de notificaciones *push* y en la aplicación para alertar a los usuarios sobre nuevas solicitudes de vinculación, aceptación de emparejamientos, mensajes recibidos y actualizaciones importantes en el estado de sus posibles colaboraciones.

C. CASO DE USO

La interacción con la aplicación comienza con la creación de perfiles, donde los usuarios crean y personalizan sus perfiles, detallando aspectos como experiencia, trabajos previos o necesidades y retos, información que es almacenada y gestionada por la base de datos/servidor. Posteriormente, habiendo creado un perfil e ingresado a su cuenta, se da la interacción con otros perfiles. Los usuarios exploran y expresan interés en otros perfiles y proyectos. El proceso de vinculación ocurre cuando se genera una conexión entre dos perfiles. Después de haberse dado la conexión, se genera la vinculación. La aplicación facilita el contacto inicial para que, por medio del servicio de mensajería de WhatsApp, se llegue a un acuerdo y se dé la comunicación directa y el cierre del acuerdo de colaboración.

En la Fig. 5 se muestra el diagrama de caso de uso ilustra las interacciones más importantes entre los principales actores (Investigadores, empresarios y la base de datos/servidor) con el sistema de la aplicación móvil de vinculación. En la figura se observa como los usuarios interactúan con la plataforma para lograr la vinculación, así como las funciones esenciales del sistema.

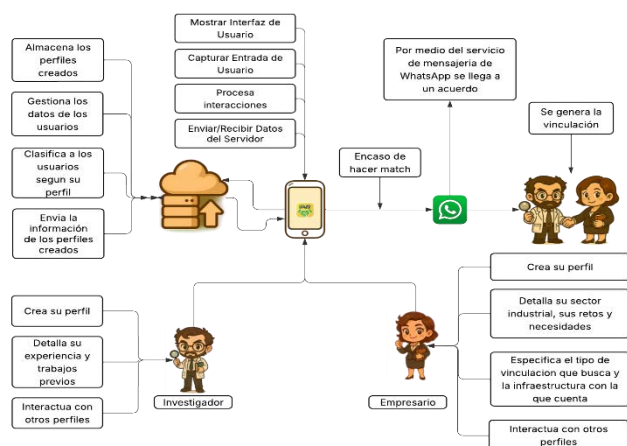


Fig. 5 Diagrama de caso de uso.

D. PRUEBAS Y VALIDACIONES

Las pruebas de la aplicación se limitaron a pruebas técnicas y de fluidez tanto de la interfaz de usuario como de las funcionalidades implementadas (como el módulo de mensajería, filtrado de los perfiles, etc.), al no estar concluido aún el desarrollo del proyecto en su totalidad, aún no se han realizado pruebas con usuarios reales. Durante el desarrollo,

se llevaron a cabo pruebas unitarias y de integración para asegurar la robustez del código y la correcta interconexión entre el *frontend* y el *backend*. Además, se realizaron pruebas de usabilidad con un grupo selecto de usuarios (mayormente estudiantes de maestría) para validar la interfaz, la experiencia de usuario y la efectividad de las funcionalidades de vinculación. La retroalimentación recolectada en estas etapas fue crucial para realizar iteraciones y mejoras continuas, garantizando que la aplicación respondiera de manera óptima a las expectativas y necesidades de los usuarios.

IV. CONCLUSIÓN

En este documento se presentó el desarrollo de una aplicación móvil funcional y la aplicación del marco de trabajo Scrum el cual nos permitió un proceso de desarrollo ágil e iterativo y facilitó una adaptación continua a los requerimientos del proyecto y aseguró un producto final de acorde a lo esperado.

La aplicación fue desarrollada con el objetivo de resolver un problema real: la falta de un canal directo y eficiente para que los investigadores y empresarios se encuentren y colaboren. Para lograr su objetivo la aplicación funciona como una plataforma digital que facilita el contacto y la creación de alianzas de colaboración. Sus funciones principales incluyen perfiles detallados que resumen la experiencia y las necesidades de cada usuario, un sistema de filtrado que ayuda a los usuarios a encontrar coincidencias de intereses y un módulo de mensajería de WhatsApp integrado para iniciar conversaciones de manera rápida y segura.

El resultado es una herramienta que facilita encontrar y establecer contactos. La aplicación demuestra que la tecnología puede ser un puente muy útil y altamente efectivo para unir el conocimiento de la academia con las necesidades del sector empresarial, impulsando así la innovación y generando nuevas oportunidades que benefician a ambos sectores.

La elección del entorno de trabajo de *Google Flutter* y el lenguaje *Dart* se tomó ya que este entorno de trabajo permitió desarrollar una sola aplicación que funciona de manera fluida tanto en teléfonos Android como en iPhone. Esto hizo el desarrollo fuera más rápido, económico y garantiza que la aplicación se vea bien y sea fácil de usar para todos.

REFERENCIAS

- [1] M. Gibbons, C. Limoges, H. Nowotny, S. Schwartzman, P. Scott, and M. Trow, *The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*. Sage Publications, 1995.
- [2] L. Leydesdorff and H. Etzkowitz, "The triple helix as a model for innovation studies," *Science and Public Policy*, vol. 25, no. 3, pp. 195-203, 1998.
- [3] E. G. Carayannis and D. F. J. Campbell, "'Mode 3' and 'Quadruple Helix': Toward a 21st century fractal innovation ecosystem," *Int. J. Technol. Manag.*, vol. 46, no. 3/4, pp. 201-234, 2009.

- [4] CONACyT, Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación 2014-2018: Avances y Resultados 2017. México, 2017. [En línea]. Disponible en: https://secihti.mx/wp-content/uploads/transparencia/planes_programas_informes/programas/PECITI2014-2018.pdf.
- [5] Donath, J. (2004). Signals in social networks. Journal of Computer-Mediated Communication.
- [6] Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). La Guía Scrum: La Guía Definitiva de Scrum: Las Reglas del Juego. Scrum.org & ScrumInc. Recuperado de <https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2020/2020-Scrum-Guide-Spanish-Latin-South-American.pdf>
- [7] K. S. Rubin (2012), Essential Scrum: A Practical Guide to the Most Popular Agile Process. Addison-Wesley.
- [8] Google. (s.f.). Flutter documentation. Recuperado de <https://flutter.dev/docs>
- [9] Saputra, D. (2020). Beginning Flutter: A Hands-On Guide to App Development. Apress.
- [10] Google. (s.f.). Dart programming language. Recuperado de <https://dart.dev/>
- [11] Sumter, S. R., Tyng-Fung, L., & Valkenburg, P. M. (2017). Love me Tinder: The effects of Tinder on adolescents' and young adults' psychosocial well-being. Journal of Youth and Adolescence.
- [12] P. de la Riva, "Redes sociales, mercado laboral y empleo," Revista de Comunicación y Salud.
- [13] M. T. O'Donnell et al., "The Impact of Glassdoor on Job Seekers' and Employees' Organizational Attitudes," Journal of Business and Psychology.
- [14] S. Ovadia, "ResearchGate and Academia.edu: Academic Social Networks," Behavioral & Social Sciences Librarian.

BIOGRAFÍAS



SALVADOR PÉREZ MARTÍNEZ Ingeniero mecatrónico egresado de la división de ingenierías de la universidad de Guanajuato campus Irapuato-Salamanca, actualmente estudiante de la maestría en administración de tecnologías en el departamento de estudios multidisciplinarios de la universidad de Guanajuato y miembro activo del Bee Software Laboratory (BSL).



GEOVANNI HERNÁNDEZ GÓMEZ Estudió su Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de Celaya realizando su trabajo de grado basado en la administración de Sistemas Operativos UNIX. Posteriormente, realizó su Maestría en Ingeniería Eléctrica (opción instrumentación) en la Universidad de Guanajuato División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca iniciando su investigación en el análisis y procesamiento de

imágenes outdoor para navegación robótica y visión humana. Así mismo, realizó su doctorado en el Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. en conjunto con la Universidad de Murcia España en su Laboratorio de Óptica (LOUM). En el 2015 trabajó como profesor invitado en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Unidad Azcapotzalco en el laboratorio de sistemas complejos. Actualmente es profesor investigador del Departamento de Estudios Multidisciplinarios sede Yuriria de la Universidad de Guanajuato y es el director ejecutivo del UG INNOVA Tecnoparque. Su área de investigación se basa en la Instrumentación aplicada en óptica fisiológica desarrollando sistemas informáticos y aplicaciones para la adquisición y manejo de datos.



PAULA ISIODRIA LACHICA Profesora-Investigadora de la Licenciatura en Agronegocios y Maestría en Gestión e Innovación Tecnológica de la Universidad de Guanajuato y Consultor Privado. Es Doctora en Ciencias Sociales por El Colegio de Sonora; es Ingeniera Industrial por la Universidad de Sonora y Maestra en Ciencias en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Hermosillo. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel I. Miembro investigador de la Redes Temáticas CONACYT "Innovación y Trabajo en la Industria Automotriz Mexicana" y "Red de Energía Solar". Coordinadora de la Licenciatura en Agronegocios de la Universidad de Guanajuato.



EDUARDO CABAL YÉPEZ Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, con Maestría en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Guanajuato y obtuvo su grado de doctor en la Universidad de Sussex en el Reino Unido. Desde 2008 se unió a la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, como profesor investigador en el Departamento de Estudios Multidisciplinarios. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), con el nombramiento de investigador nacional Nivel 2. Ha participado como autor/coautor de más de 90 artículos de investigación publicados en revistas de alto factor de impacto, registradas en el Journal Citation Report (JCR) y memorias de congresos internacionales. Sus áreas de interés son instrumentación digital, procesamiento digital de imágenes y señales, inteligencia artificial, robótica, sensores inteligentes, procesamiento en tiempo real, mecatrónica, FPGAs, calidad de la energía y sistemas embebidos, entre otras. Actualmente, funge como editor de área para procesamiento de señales y electrónica de potencia en la revista científica internacional Computers and Electrical Engineering de la editorial Elsevier y como editor asociado para las revistas científicas internacionales Digital Signal Processing de la editorial Elsevier e IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.



CIENERGIA UG

Congreso Internacional de Energía UG



 [cinergia.ug](https://www.facebook.com/cinergia.ug)

 [cinergia_ug](https://www.instagram.com/cinergia_ug)

 cinergia@ugto.mx

Ciudad universitaria No. 112, Comunidad de San Rafael
de Uruétaro, 36880 Salamanca, Gto.

www.cinergiaug.org