

Número: 28

Redalyc 3.0

ESCI Web of science

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

pISSN : 1390-650X

eISSN : 1390-860X

julio/ diciembre 2022

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología



Consideraciones en el diseño de subestaciones eléctricas, incluyendo el efecto del gradiente de potencial en las estructuras metálicas circundantes

Pag. 9



Control Pasivo Tolerante a Fallos de sentido en dispositivos de compensación dinámicos - SVC mediante una estrategia híbrida

Pag. 34



Mejora del proceso de molienda de lactosa para una empresa fabricante de productos lácteos

Pag. 71



Análisis comparativo de confort térmico de vivienda unifamiliar en LSF frente a mampostería

Pag. 100

INGENIUS

INGENIUS • Número Especial 28 • julio/diciembre 2022. Revista de Ciencia y Tecnología de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación dedicada a estudios relacionados con las Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecatrónica, Ciencias de la Computación y áreas afines.

Consejo de Editores

RAFAEL ANTONIO BALART GIMENO, PHD, Universidad Politécnica de Valencia, España – Editor Jefe.

JOHN IGNACIO CALLE SIGÜENCIA, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Jefe.

ESTEBAN MAURICIO INGA ORTEGA, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Asociado.

MARLON XAVIER QUINDE ABRIL, MSC, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Asociado.

TEODIANO FREIRE BASTOS FILHO, PHD, (Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil – Editor Asociado.

Consejo Científico

JUAN LÓPEZ MARTÍNEZ, PHD, Universidad Politécnica de Valencia, España.

ELENA FORTUNATI, PHD, Universidad de Perugia, Italia.

GUSTAVO ROVELO RUIZ, PHD, Hasselt University, Diepenbeek, Bélgica.

FRANKLIN GAVILANEZ ALVAREZ, PHD, American University, Estados Unidos.

PIEDAD GAÑAN ROJO, PHD, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

JOSÉ ALEX RESTREPO, PHD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

SERGIO LUJAN MORA, PHD, Universidad de Alicante, España.

MARTHA ZEQUERA DÍAZ, PHD, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.

GROVER ZURITA, PHD, Universidad Privada Boliviana, Bolivia.

VLADIMIR ROBLES, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

GERMÁN ARÉVALO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WILBERT AGUILAR, PHD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

PABLO PARRA ROSERO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JACK BRAVO TORRES, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WALTER OROZCO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MARIELA CERRADA, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JULIO CÉSAR VIOLA, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

SERGIO GAMBOA SÁNCHEZ, PHD, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

ROGER ABDÓN BUSTAMANTE PLAZA, PHD, Universidad de Chile, Chile.

CHRISTIAN BLUM, PHD, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España.

SILVIA NOEMI SCHIAFFINO, PHD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

ANALÍA ADRIANA AMANDI, PHD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

RUBÉN DE JESÚS MEDINA MOLINA, PHD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

JOHNNY JOSUÉ BULLÓN TORREALBA, PHD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

RODRIGO PALMA HILLERNS, PHD, Universidad de Chile, Chile.

GERARDO ESPINOZA PÉREZ, PHD, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

ALEXANDRE MENDES ABRÃO, PHD, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

KAMLA ABDEL RADI ISMAIL, PHD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

ARNALDO DA SILVA, PHD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

ÁLVARO ROCHA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JOSÉ ANTENOR POMILIO, PHD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

LUIS PAULO REIS, PHD, Universidad de Minho, Portugal.

LUÍS FERNANDES, PHD, Escuela Superior Náutica Infante d. Henrique, Portugal.

ANÍBAL TRAÇA DE ALMEIDA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JORGE SÁ SILVA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

PEDRO MANUEL SOARES MOURA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

SÉRGIO MANUEL RODRIGUES LOPES, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

RICARDO MADEIRA SOARES BRANCO, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

CARLOS ALEXANDRE BENTO CAPELA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

FILIPPE ARAUJO, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUIS MANUEL GUERRA SILVA ROSA, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

HÉLDER DE JESUS FERNANDES, PUGA, PHD, Universidad de Minho, Portugal.

FILIPPE SAMUEL, PEREIRA DA SILVA, PHD, Universidad de Minho, Portugal.

CÉSAR SEQUEIRA, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JOSÉ TEIXEIRA ESTÊVÃO FERREIRA, PHD,

Universidad de Coimbra, Portugal.

NUNO LARANJEIRO, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUÍS AMARAL, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JORGE HENRIQUES, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

WILLIAM IPANAQUE, PHD, Universidad de Piura, Perú.

LORENZO LEIJA SALAS, PHD, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

VALERI KONTOROVICH MAZOVER, PHD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

ALEJANDRO ÁVILA GARCÍA, PHD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

PAOLO BELLAVISTA, PHD, Universidad de Bologna, Italia.

CARLOS RUBIO, PhD, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

FERNANDO HERNÁNDEZ SÁNCHEZ, PhD, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.

EMILIO MUÑOZ SANDOVAL, PhD, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.

YASUHIRO MATSUMOTO KUWABARA, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

DAVID ZUMOFFEN, PhD, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, Argentina.

VICENTE RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, PhD, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.

ALEJANDRO RODRÍGUEZ ÁNGELES, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

ALISTAIR BORTHWICK, PhD, Universidad de Edimburgo, Reino Unido.

Consejo de Revisores

FEDERICO DOMINGUEZ, PHD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

ENRIQUE CARRERA, PHD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

ANDRÉS TELLO, MSc, Universidad de Cuenca, Ecuador.

CRISTIAN GARCÍA BAUZA, PHD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

OSVALDO AÑÓ, PHD, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

THALÍA SAN ANTONIO, PHD, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

VICTOR SAQUICELA, PHD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

GONZALO OLMEDO, PHD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

ROMÁN LARA, PHD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

GUILLERMO SORIANO, PHD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

MARÍA FERNANDA GRANDA, PHD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

RICARDO CAYSSIALS, PHD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

LEONARDO SOLAQUE GUZMAN, PHD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

JOSÉ DI PAOLO, PHD, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.

ASTRID RUBIANO FONSECA, PHD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

ROBINSON JIMÉNEZ, PHD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

ALFONSO ZOZAYA, PHD, Universidad de Carabobo, Venezuela.

MAURICIO MAULEDOUX, PHD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

LUIS MEDINA, PHD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

ERNESTO CUADROS-VARGAS, PHD, Universidad Católica San Pablo, Perú.

SAMUEL SEPÚLVEDA CUEVAS, PHD, Universidad de la Frontera, Chile.

CARLOS CARES, PHD, Universidad de la Frontera, Chile.

RAFAEL SOTELO, PHD, Universidad de Montevideo, Uruguay.

OMAR LOPEZ, PHD, Universidad de Los Andes, Colombia.

JOB FLORES-GODOY, PHD, Universidad Católica del Uruguay, Uruguay.

LUIS MARIO MATEUS, PHD, Universidad de los Andes, Colombia.

AMADEO ARGÜELLES CRUZ, PHD, Instituto Politécnico Nacional, México.

SANTIAGO BENTANCOURT PARRA, PHD, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

GERMÁN ZAPATA, PHD, Universidad Nacio-

nal de Colombia, Colombia.

PEDRO GARCÍA, PHD, Universidad Autónoma de Barcelona, España.

ARTURO CONDE ENRÍQUEZ, PHD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

ALBERTO CAVAZOS GONZÁLEZ, PHD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

ERNESTO VÁZQUEZ MARTÍNEZ, PHD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

MIGUEL DÍAZ RODRIGUEZ, PHD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

EFRAÍN ALCORTA GARCÍA, PHD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

LUIS CHIRINOS GARCIA, PHD, Pontificia Universidad Católica de Perú, Perú.

OSCAR AVILÉS, PHD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

DORA MARTÍNEZ DELGADO, PHD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

DAVID OJEDA, PHD, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.

IRENE BEATRÍZ STEINMANN, PHD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

MARIO SERRANO, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

CORNELIO POSADAS CASTILLO, PHD, Universidad Autónoma Nuevo León, México.

MARIO ALBERTO RIOS MESIAS, PHD, Universidad de Los Andes, Colombia.

YUDITH CARDINALE VILLARREAL, PHD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

EDUARDO MATALLANAS, PHD, Universidad Politécnica de Madrid, España.

JOSE EDUARDO OCHOA LUNA, PHD, Universidad Católica San Pablo, Perú.

DANTE ANGEL ELIAS GIORDANO, PHD, Pontificia Universidad Católica de Perú, Perú.

MANUEL PELAEZ SAMANIEGO, PHD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

JUAN ESPINOZA ABAD, PHD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

PIETRO CODARA, PHD, Universidad de Milán, Italia.

ALBERTO SORIA, PHD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

JOSÉ M. ALLER, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FERNEY AMAYA F., PHD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

SANTIAGO ARANGO ARAMBURO, PHD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

DIEGO ARCOS-AVILÉS, PHD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

PABLO AREVALO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ROBERTO BELTRAN, MSc, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

LEONARDO BETANCUR, PHD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

ROBERTO GAMBOA, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

PAULO LOPES DOS SANTOS, PHD, Universidad do Porto, Portugal.

PEDRO ANDRÉ DIAS PRATES, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JOSÉ MANUEL TORRES FARINHA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

CELSO DE ALMEIDA, PHD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

RAMON MOLINA VALLE, PHD, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

CRISTINA NADER VASCONCELOS, PHD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

JOÃO M. FERREIRA CALADO, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

GUILHERME LUZ TORTORELLA, PHD, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

MAURO E. BENEDET, PHD, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

ARTEMIS MARTI CESCHIN, PHD, Universidade de Brasilia, Brasil.

GILMAR BARRETO, PHD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

RICARDO EMILIO F. QUEVEDO NOGUEIRA, PHD, Universidad Federal de Ceará, Brasil.

WESLEY LUIZ DA SILVA ASSIS, PHD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

ANA P. MARTINAZZO, PHD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

JORGE BERNARDINO, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUIS GERALDO PEDROSO MELONI, PHD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

FACUNDO ALMERAYA CALDERÓN, PHD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

FREDDY VILLAO QUEZADA, PHD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

JOSE MANRIQUE SILUPU, MSc, Universidad de Piura, Perú.

GERMÁN ARIEL SALAZAR, PHD, Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional, Argentina.

JOSÉ MAHOMAR JANANIÁS, PHD, Universidad del BIOBIO, Chile.

ARNALDO JÉLVEZ CAAMAÑO, PHD, Universidad del BIOBIO, Chile.

JORGE ANDRÉS URIBE, MSc, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

RICARDO BELTRAN, PHD, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.

ADI CORRALES, MSc, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

JORGE URIBE CALDERÓN, PHD, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México

JOSÉ TRINIDAD HOLGUÍN MOMACA, MSc, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.

JUAN MANUEL ALVARADO OROZCO, PhD, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

ARNALDO JÉLVEZ CAAMAÑO, PhD, Universidad del BIOBIO, Chile.

JAVIER MURILLO, PhD, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, Argentina.

LUCAS DANIEL TERISSI, PhD, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

RENE VINICIO SANCHEZ LOJA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FREDDY LEONARDO BUENO PALOMEQUE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO CABRERA MENDIETA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

EDWUIN JESUS CARRASQUERO, PhD, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

CARLOS MAURICIO CARRILLO ROSERO, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

DIEGO CARRION GALARZA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARMEN CELI SANCHEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO CHACON TROYA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAUL CHASI, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN CHICA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO MARCELO CORDERO GUZMÁN, MSc, Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.

LUIS JAVIER CRUZ, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

FABRICIO ESTEBAN ESPINOZA MOLINA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JORGE FAJARDO SEMINARIO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PATRICIA FERNANDEZ MORALES, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

MARCELO FLORES VAZQUEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARLOS FLORES VÁZQUEZ, MSc, Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.

CARLOS FRANCO CARDONA, PhD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

CRISTIAN GARCÍA GARCÍA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

TEONILA GARCÍA ZAPATA, PhD, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

LUIS GARZÓN MÑOZ, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

NATALIA GONZALEZ ALVAREZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ERNESTO GRANADO, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

ADRIANA DEL PILAR GUAMAN, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN INGA ORTEGA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ESTEBAN INGA ORTEGA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAOLA INGAVÉLEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CESAR ISAZA ROLDAN, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana.

NELSON JARA COBOS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

RUBEN JERVES, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

VICTOR RAMON LEAL, PhD, Investigador de PDVSA, Venezuela

GABRIEL LEON, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

EDILBERTO LLANES, PhD, Universidad Internacional SEK, Ecuador.

LUIS LÓPEZ LÓPEZ, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARLOS MAFLA YÉPEZ, MSc, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.

HADER MARTÍNEZ, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

JAVIER MARTÍNEZ, PhD, Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ecuador.

ALEX MAYORGA, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

JIMMY MOLINA, MSc, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

ANDRES MONTERO, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

VICENTE MORALES, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

FABIÁN MORALES, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

DIEGO MORALES, MSc, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables del Ecuador.

YOANDRYS MORALES TAMAYO, PhD, Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi

OLENA LEONIDIVNA NAIDIUK, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

OSCAR NARANJO, MSc, Universidad del Azuay, Ecuador.

PAUL NARVAEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

HERNÁN NAVAS OLMEDO, MSc, Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador.

CESAR NIETO, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

FABIO OBANDO, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

LUIS ORTIZ FERNANDEZ, MSc, Universidade Federal de Rio Grande del Norte, Brasil

PABLO PARRA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAULO PEÑA TORO, PhD, Ministerio de Productividad, Ecuador.

PATSY PRIETO VELEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO QUINDE FALCONI, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIANA QUINTANA ESPINOZA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WILLIAM QUITIAQUEZ SARZOSA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FLAVIO QUIZHPI PALOMEQUE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WASHINGTON RAMIREZ MONTALVAN, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FRAN REINOSO AVECILLAS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

NÉSTOR RIVERA CAMPOVERDE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JORGE ROMERO CONTRERAS, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela

FABIAN SAENZ ENDERICA, MSc, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

LUISA SALAZAR GIL, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

GUSTAVO SALGADO ENRÍQUEZ, MSc, Universidad Central del Ecuador., Ecuador.

JUAN CARLOS SANTILLÁN LIMA, MSc, Universidad Nacional de Chimborazo

ANDRÉS SARMIENTO CAJAMARCA, MSc, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil

RODOLFO BOJORQUE CHASI, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAUL TORRES JARA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

RODRIGO TUFIÑO CÁRDENAS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FERNANDO URGILES ORTÍZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN VALLADOLID QUITOISACA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MARY VERGARA PAREDES, PhD, Universidad de los Andes, Merida, Venezuela

JENNIFER YEPEZ ALULEMA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JULIO ZAMBRANO ABAD, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PATRICIA ZAPATA MOLINA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Consejo de publicaciones

JUAN CÁRDENAS TAPIA, SDB, PHD
JAVIER HERRÁN GÓMEZ, SDB, PHD
JOSÉ JUNCOSA BLASCO, PHD
JUAN PABLO SALGADO GUERRERO, PHD
ÁNGEL TÓRRES TOUKOUMIDIS, PHD
JAIME PADILLA VERDUGO, PHD
SHEILA SERRANO VINCENTI, MSC
JORGE CUEVA ESTRADA, MSC
JOHN CALLE SIGÜENCIA, PHD
FLORALBA AGUILAR GORDÓN, PHD
BETTY RODAS SOTO, MSC
MÓNICA RUIZ VÁSQUEZ, MSC
JORGE ALTAMIRANO SÁNCHEZ, MSC
DAVID ARMENDÁRIZ GONZÁLEZ, MSC

Editor General

ÁNGEL TÓRRES TOUKOUMIDIS, PHD

Consejo Técnico

ÁNGEL TORRES-TOUKOUMIDIS, PHD
DRA. MARCIA PEÑA, Revisora de Estilo,
Centro Gráfico Salesiano - Editorial Don Bosco
MARLON QUINDE ABRIL, MSC, Diagramación y Maquetación
DANIELA TÓRRES CARRERA

Servicio de Publicaciones

HERNÁN HERMOSA (Coordinación General)
MARCO GUTIÉRREZ (Soporte OJS)
PAULINA TORRES (Edición)
RAYSA ANDRADE (Maquetación)
MARTHA VINUEZA (Maquetación)
ADRIANA CURIEL AVILA, (Traducción)

Editorial

Editorial Abya Yala (Quito-Ecuador),
Avenida 12 de octubre N422 y Wilson,
Bloque A, UPS Quito, Ecuador.
Casilla 17-12-719 Teléfonos: (593-2) 3962800 ext. 2638
Correo electrónico: editorial@abyayala.org

Tiraje: 800 ejemplares

Sistema tipográfico usado en la composición de este documento L^AT_EX.

INGENIUS

REVISTA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Número Especial 28: Redes Eléctricas y Ciudades Inteligentes

julio – diciembre 2022

ISSN impreso 1390-650X / ISSN electrónico 1390-860X

La administración de INGENIUS se realiza a través de los siguientes parámetros:

La revista utiliza el sistema antiplagio académico  

Los artículos cuentan con código de identificación (*Digital Object Identifier*) 

El proceso editorial se gestiona a través del *Open Journal System* 

Es una publicación de acceso abierto (*Open Access*) con licencia *Creative Commons*



Las políticas *copyright* y de uso *postprint*, se encuentran publicadas en el Repositorio de Políticas de Autoarchivo *Sherpa/Romeo*. 

Los artículos de la presente edición pueden consultarse en
<http://revistas.ups.edu.ec/index.php/ingenius>



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

La Revista INGENIUS está indexada en las siguientes Bases de Datos y sistemas de información científica:

BASE DE DATOS SELECTIVAS



PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS



DIRECTORIOS SELECTIVOS



HEMEROTECAS SELECTIVAS



BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS



OTRAS BASES DE DATOS BIBLIOGRÁFICAS



CATÁLOGO DE BIBLIOTECAS INTERNACIONALES UNIVERSITARIAS



UNIVERSITÄT BAMBERG



Estimadas y estimados lectores:

Como consecuencia del constante crecimiento de las ciudades y la necesidad de los usuarios de mejorar su calidad de vida, el consumo de energía se ha incrementado debido a los dispositivos electrónicos incorporados en los hogares (interiores) y en las aplicaciones de uso público (exteriores).

Dentro de las etapas de una red inteligente se escenifica, como respuesta a la demanda, la infraestructura de medición inteligente presentada en el artículo «Medidor de consumo eléctrico para promover el ahorro en los consumidores residenciales»; además, se debe contemplar la inclusión de energía renovable en sistemas fotovoltaicos, eólicos, y que puedan incorporarse a la red a partir de la microgeneración incluyendo la generación distribuida. Se debe considerar el despliegue masivo de centros de recarga para vehículos eléctricos y el aumento del empleo de cocinas de inducción en los hogares.

En consecuencia, el cliente demanda una red eléctrica que soporte nuevos servicios, muchos de los cuales dan lugar a una ciudad inteligente, capaz de prestar servicios a favor de la sociedad. Muchos prevén la gestión inteligente de los residuos domésticos y sistemas innovadores de parques, entre otros.

Las subestaciones eléctricas requieren sistemas robustos de puesta a tierra para garantizar la calidad y fiabilidad del sistema que se incorpora a un internet de las cosas, como se denomina a las aplicaciones que se relacionan con la telemática. Esto implica una red inalámbrica heterogénea que permitirá la conexión de sensores o contadores inteligentes en microrredes basadas en sistemas de energía limpia, en el artículo «Metodología para el diseño de subestaciones eléctricas considerando el efecto del gradiente de potencial en las estructuras metálicas circundantes», se fundamentan estos sistemas.

Un sistema de control tolerante a fallos, que evalúa el artículo «Control pasivo tolerante a fallos de

detección en dispositivos de compensación dinámica - SVC a través de una estrategia híbrida», estará involucrado. Cada dispositivo inteligente puede presentar contingencias que deben, en la mayoría de los casos, ser autocontrolados, lo que implica técnicas de inteligencia artificial y control robusto que incluye algoritmos desarrollados en el sistema web.

Adicionalmente, las diferentes aplicaciones que involucran sensores requieren de plataformas desarrolladas e integradas en sistemas embebidos y software no licenciado para lograr un despliegue más significativo de soluciones con costos reducidos, ya que el número de dispositivos dependiendo de la aplicación exterior podría llegar a un centenar de estos dispositivos. Este impacto se evalúa en el artículo «Plataforma de aprendizaje remoto para microcontroladores e internet de las cosas».

Así, las redes y ciudades inteligentes están en continuo cambio y avance, lo que advierte de nuevos campos de investigación en los que se deben incorporar aspectos de georreferenciación para la localización exacta de un sensor. Dicho sensor puede ser el contador de energía eléctrica o el dispositivo para localizar el contenedor de residuos de un barrio o sector, además de otras implicaciones que se evalúan en el artículo «Diseño y validación de sistema de medición IoT para una generación fotovoltaica».

Las redes eléctricas, las de telecomunicaciones, las de agua, las de gas y las de transporte público masivo pueden incorporar despliegues georreferenciados que faciliten y reduzcan el tiempo de despliegue y su posterior mantenimiento a través de la teoría de grafos y técnicas heurísticas.

Una solución de ciudad incorpora varios recursos que deben ser optimizados para minimizar el impacto en la inversión. Un mejor estilo de vida implica una planificación y una oportunidad para que la solución tecnológica sea escalable en el tiempo, no solo una solución momentánea.

Esteban Inga Ortega, PhD
EDITOR ASOCIADO

ÍNDICE

Consideraciones en el diseño de subestaciones eléctricas, incluyendo el efecto del gradiente de potencial en las estructuras metálicas circundantes	9
Considerations in the design of electrical substations, including the effect of potential gradient on surrounding metallic structures	
Wilo Chiliquina, Pablo Robles	
Localización de recursos distribuidos en redes eléctricas rurales-urbanas marginales considerando el índice de predicción de colapso de tensión	25
Location of distributed resources in rural-urban marginal power grids considering the voltage collapse prediction index	
Anabel Lemus, Diego Carrión, Eduar Aguirre, Jorge W. González	
Control Pasivo Tolerante a Fallos de sensado en dispositivos de compensación dinámicos - SVC mediante una estrategia híbrida	34
Passive Control Tolerant to Sensing Faults in dynamic compensation devices SVC through a hybrid strategy	
Jessica Ramírez, Leony Ortiz, Alexander Aguila	
Diseño IoT y validación de sistema de medida para generación fotovoltaica	44
Design and validation of IoT measurement system for photovoltaic generation	
Thiago Angelino dos Santos, Filipe Gomes de Freitas, Diego Lima Carvalho Gonçalves, Luis Miguel Fernández-Ramírez	
Plataforma de enseñanza a distancia de microcontroladores e internet de las cosas ...	53
Platform for Distance Learning of Microcontrollers and Internet of Things	
Renata Pereira, Cleonilson de Souza, Darwin Patino, Juan Lata	
Análisis estructural de un bus de dos pisos de larga distancia durante colisiones	63
Structural Analysis of a Long-distance Double-decker Bus During Crashes	
Jimmy Brito Morocho, Marco Amaya Pinos, Luis López López, Fabricio Espinoza Molina	
Mejora del proceso de molienda de lactosa para una empresa fabricante de productos lácteos	71
Improvement of the lactose grinding process for a company manufacturing dairy products	
Darío J. Pinguil Loja, Víctor R. Lojano Pillco, Nelson G. Jara Cobos, Fran Z. Reinoso AVECILLAS	
Modelo matemático de un horno resistivo para termoformado de láminas de polipropileno	80
Mathematical model of a resistive oven for thermoforming polypropylene sheets	
Lidia Castro-Cepeda, José Cortés-Llanganate	
Análisis estructural y modal de las placas adaptación para martillos hidráulicos y minicargadores en condiciones reales de operación	92
Structural and Modal Analysis Of Adapter Plates For Hydraulic Hammers And Skid Steers Under Real Work Condition	
Yuri Villa, Trevor Vook, Jorge L.Villa, Pablo Carbajal, Leonardo Barrera, Max Florez	
Análisis comparativo de confort térmico de vivienda unifamiliar en LSF frente a 100 mampostería	
Comparative analysis of thermal comfort of a single-family house in LSF and brick masonry	
Rodrigo Brito-Peña, Daniel Villa-Enderica, Esteban Zalamea-León	
Normas editoriales	125
Guidelines	



CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS, INCLUYENDO EL EFECTO DEL GRADIENTE DE POTENCIAL EN LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS CIRCUNDANTES

CONSIDERATIONS IN THE DESIGN OF ELECTRICAL SUBSTATIONS, INCLUDING THE EFFECT OF POTENTIAL GRADIENT ON SURROUNDING METALLIC STRUCTURES

Wilo Chiliquinga¹ , Pablo Robles^{2,*} 

Recibido: 23-05-2022, Recibido tras revisión: 13-06-2022, Aceptado: 22-06-2022, Publicado: 01-07-2022

Resumen

Para el diseño y el estudio de un sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica (*Grounding Systems, GS*, en inglés), se considera una subestación remota simple según los procedimientos de seguridad indicados en la norma IEEE 80. Los materiales metálicos enterrados o las estructuras metálicas cercanas ponen en peligro permanente la vida humana cuando se producen fallas eléctricas. Se presentan escenarios relacionados con el diseño de subestaciones eléctricas que consideran la transferencia de potenciales eléctricos que pueden producirse entre la GS y los materiales metálicos enterrados en sus proximidades. Se evalúa el comportamiento de la transferencia de potencial, se calculan los valores de las tensiones transferidas y se identifican las principales variables que influyen en los niveles de tensión transferidos. Las simulaciones se realizan con el programa CYMGRD específico para el cálculo de GS. Su análisis genera resultados reales en la transferencia de potencial que deben ser considerados por el ingeniero de diseño de GS, lo que permite evitar el diseño de subestaciones aisladas sin tener en cuenta los elementos existentes que pueden afectar al entorno de la subestación.

Palabras clave: subestación eléctrica, sistemas de puesta a tierra, red de tierra, transferencia de potencial, tensión de paso y de contacto, estructuras metálicas enterradas

Abstract

For designing and studying an electrical substation grounding system (GS), a simple remote substation is considered according to the safety procedures indicated in the IEEE 80 Standard. Buried metallic materials or nearby metallic structures permanently endanger human life when electrical faults occur. Scenarios related to the design of electrical substations that consider the transfer of electrical potentials that can occur between the GS and buried metallic materials in their vicinity are presented, the behavior of potential transfer is evaluated, values of transferred voltages are calculated, and the main variables that influence the transferred voltage levels are identified. The simulations are performed with the CYMGRD software specific for GS calculations. Its analysis generates real results in the potential transfer that must be considered by the GS design engineer, which enables to avoid designing isolated substations without taking into account existing elements that may affect the substation surroundings.

Keywords: Electrical substation, grounding systems, ground grid, potential transfer, step and touch voltage, buried metal structures

¹Master of Electricity Program, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

^{2,*}Research Group on Smart Grids GIREI, IUS-RECI Electricity Grids and Smart Cities, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: pablo121075@icloud.com

Forma sugerida de citación: Chiliquinga, W. y Robles, P. "Consideraciones en el diseño de subestaciones eléctricas, incluyendo el efecto del gradiente de potencial en las estructuras metálicas circundantes". *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*. N.º 28. pp. 9-24. 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.01>.

1. Introducción

El GS es un factor esencial en la seguridad humana y en el mantenimiento de las entradas eléctricas que constituyen una subestación, al considerar su costo y durabilidad [1]. En el GS, las corrientes de falla a tierra deben ser disipadas de forma segura para retornar la tierra a sus fuentes, de manera que los dispositivos de protección puedan desconectar rápidamente la alimentación y eliminar la falla. Sin embargo, las corrientes de falla que fluyen a través de la red de tierra también lo hacen a través de otros objetos metálicos enterrados, incluyendo sistemas de puesta a tierra conectados a otras instalaciones no afectadas por las fallas [2], [3], [4], [5].

A pesar de que los GS pueden estar físicamente aislados entre sí, están ligados eléctricamente a través de acoplamientos indeseados, que transfieren potenciales eléctricos peligrosos desde las mallas con corrientes de falla a las mallas pasivas no energizadas de otros GS, con el riesgo de electrocución para el personal presente en esas áreas [6], [7], [8], [9]. Un aislamiento deficiente en la industria del petróleo y gas contribuye a tiempos de parada innecesarios, pero la falta de una buena puesta a tierra también es peligrosa y aumenta el riesgo de falla de los equipos, lo que conlleva a errores en la instrumentación, problemas de distorsión armónica y problemas de factor de potencia [10], [11], [12].

Los oleoductos y gasoductos son estructuras grandes y sofisticadas que deben estar protegidas contra descargas eléctricas y, especialmente, contra la corrosión. En el diseño del GS debe incluirse protección catódica [CP], además de los efectos eléctricos que pueden ocurrir cuando estos dos sistemas, GS y CP, están juntos [13], [14], [15], [16], [17].

Este artículo apunta a presentar casos de estudio sobre los problemas introducidos por la presencia de estructuras metálicas y los sistemas de protección asociados, entre otros, en la transferencia de gradientes de potencial [GPG] en GS pasivos. Los procedimientos de diseño descritos en los estándares relacionados con los GS de subestaciones eléctricas, en áreas urbanas y estaciones de petróleo, permiten el cálculo de niveles seguros de tensiones de paso y de contacto dentro del área de la subestación, pero los GPG adyacentes no son tomados en cuenta [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24].

El tipo de material utilizado puede ser un factor decisivo en la electrocución humana. Dentro de las subestaciones, la tensión de contacto (*Maximum Touch Voltage*, MTV, por sus siglas en inglés) y la tensión de paso (*Maximum Step Voltage*, MSV, por sus siglas en inglés) son menos peligrosas debido a la capa superficial de alta resistividad [25]. Sin embargo, esta capa no se extiende hacia el exterior de las subestaciones, donde las tensiones de contacto y paso pueden ser dañinas, y aún más si hay estructuras metálicas enterradas adjuntas no conectadas al GS [26], [27], [28], [29].

1.1. Trabajos relacionados

El gradiente de potencial generado [30], [31] en complejos refinadores de petróleo, en el caso de una falla en una subestación eléctrica, causa su transferencia a las áreas de procesos, provocando daños al sistema de instrumentación [32], [33].

Las partes metálicas tales como tuberías de agua y gas, rieles y cimientos de los edificios pueden modificar la distribución de potencial eléctrico en el área, dependiendo de la topología estructural, lo cual desencadena en el efecto del GPG [8].

El GS debe considerar los conductores directamente involucrados en la instalación protegida, y cualquier otra, conectada o no, que puede interactuar con todo el GS (Figura 1).

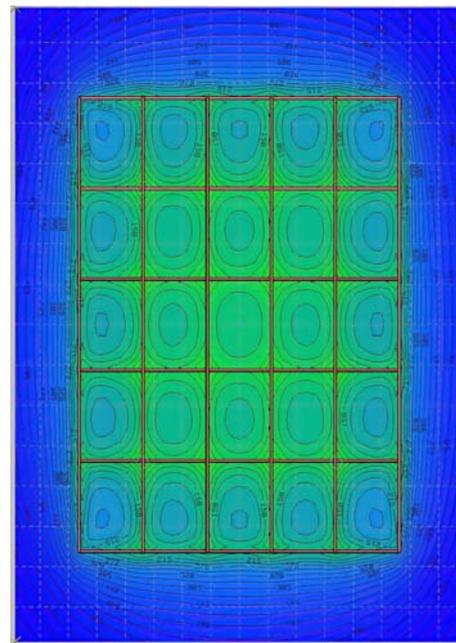


Figura 1. Contorno equipotencial de una malla de un GS

Las tuberías que transportan productos peligrosos están protegidas contra la corrosión, usualmente, por capas de materiales de recubrimiento integrados con sistemas de protección catódica activa [34], [35]. El flujo de corriente, típicamente adoptado para estructuras grandes o largas, fuerza a la tubería para comportarse como un cátodo, proporcionando así protección contra la corrosión de sus partes expuestas cuando el recubrimiento falla. Sin embargo, las líneas enterradas con protección catódica cerca de las redes de aterramiento de subestaciones eléctricas, permiten la posibilidad de unión y reducen el riesgo de tensiones de contacto metal con metal. Esta conexión de unión, necesaria para la seguridad del personal operativo, puede comprometer la efectividad de la CP. Para evitar la corrosión del CP y de la unión con la malla, deben considerarse sales minerales que se ionizan formando un electrolito sólido con el pH que varía entre

2. Materiales y metodos

2.1. Formulación del problema

La Figura 2 presenta el diagrama de flujo de la metodología de diseño de la subestación eléctrica, incluyendo el efecto del gradiente de potencial sobre las estructuras metálicas circundantes, donde la experiencia del diseñador permite obtener resultados de acuerdo con el umbral del voltaje de contacto y el umbral del voltaje de paso.

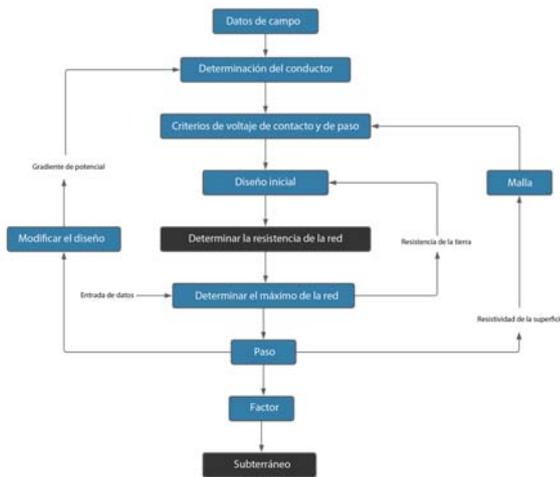


Figura 2. Metodología utilizada para el diseño

Se presentan casos de estudio que permitirán analizar la transferencia de potencial. La simulación de los escenarios se lleva a cabo con el software especializado CYMGRD, usando el método de elementos finitos (MEF) desarrollado por EATON; este software permite la interpretación de las mediciones de resistividad del suelo, elevación del potencial de tierra, y evaluación de puntos peligrosos en cualquier área de interés adicional, genera una interpretación visual de los resultados del análisis del potencial de la malla. Los escenarios propuestos están de acuerdo con el tipo de capa superficial empleada y el análisis de transferencia del potencial; la data de entrada presentada corresponde a la Tabla 3.

El presente estudio se enfoca en la variación de la capa superficial, la ubicación física de la malla y las diferentes ubicaciones de las estructuras metálicas circundantes.

En el caso de redes asimétricas, el análisis es similar; tomando la estratigrafía del terreno, la métrica de estudio de la transferencia de gradientes de potencial expuestos se aplica a cualquier configuración de red.

Los valores de los parámetros del GS se toman en función de la malla indicada en la Figura 3, de manera que la importancia del voltaje de paso y contacto no exceda los valores máximos permitidos; el uso de barras de cobre o electrodos no se considera para estas simulaciones.

Tabla 3. Notación general y descripciones

Nomenclatura	Descripción
<i>Uniform</i>	Modelo terrestre
ρ 50 Ω - m	Resistividad de la capa superior
40°C	Temperatura ambiente
0.15 μ m	Espesor de la capa superficial
ρ_s -200 Ω -m - concrete	Resistividad de la capa superficial
ρ_s - 5000 Ω -m - gravel	Resistividad de la capa superficial
ρ_s -10000 Ω -m - asphalt	Resistividad de la capa superficial
0.1sec	Tiempo de duración de la falla
10kA	Corriente de falla
50kg	Masa del cuerpo humano
<i>Sf</i> 100V	Factor de división de corriente
<i>Cp</i> 100V	Factor de crecimiento
1m	Profundidad de la red
<i>Cu</i> 4 - 0AWG	Conductor Cu

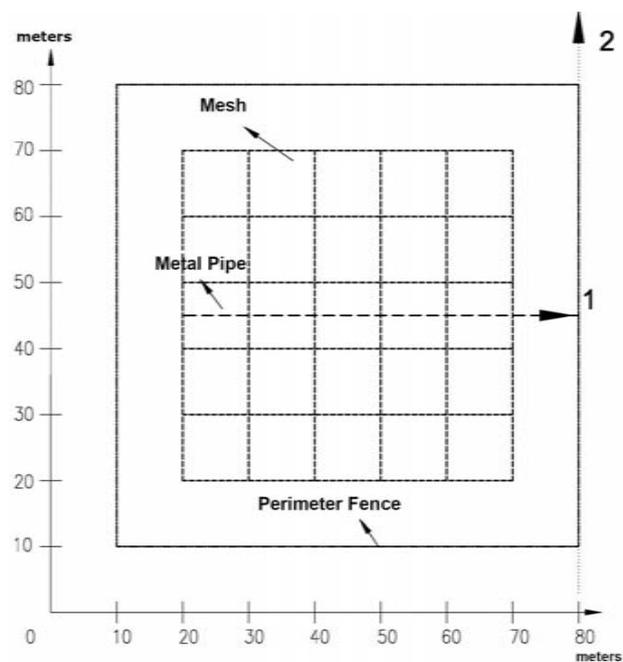


Figura 3. Vista superior del GS del caso de estudio 1

Para el diseño y simulación de los escenarios, se considera el peso del cuerpo de una persona de 50 kg.

Asumiendo el caso más sensible que puede ocurrir, el conductor de malla óptimo para esta configuración es un conductor de cobre de 20,3776 mm², equivalente a 2/0 AWG para la simulación de los escenarios, se toma un conductor de cobre 4/0 AWG, donde el estándar IEEE 80 sugiere considerar los efectos de la corrosión debido al PH de la estratigrafía del suelo [22].

2.1.1. Caso de estudio 1

La Figura 3 muestra una malla de puesta a tierra de una subestación, con una dimensión de 50×50 metros y redes de 10 metros; el conductor del perímetro del GS está a 1 m de profundidad en suelo uniforme, con un tubo metálico recto cilíndrico a una profundidad de 2 m.

Se analizan aspectos tales como a) los efectos producidos por la transferencia de potenciales en la red cuando está presente una malla perimetral metálica subterránea, y b) los efectos debido a transferencias de potencial causadas por la presencia de un tubo metálico enterrado bajo el GS.

Diferentes configuraciones del GS y de la tubería subterránea fueron consideradas para el análisis. Los potenciales se analizan en una malla asimétrica; se presenta un caso dependiendo de la topología y las facilidades ofrecidas por su construcción en sitio.

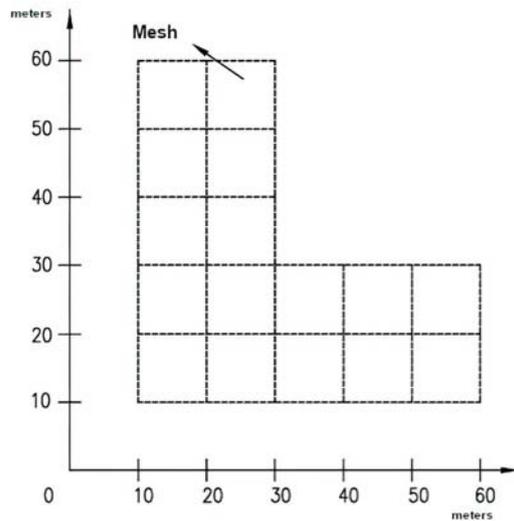


Figura 4. Vista superior de una malla tipo L asimétrica

2.1.2. Caso de estudio 2

En la Figura 5 se agregan rieles ubicados a una distancia «d» de la malla; para el caso de estudio 2, la transferencia de potencial se refleja en los cambios de tensiones de contacto, paso, GPG y R_g que ocurren en las direcciones que serán analizadas.

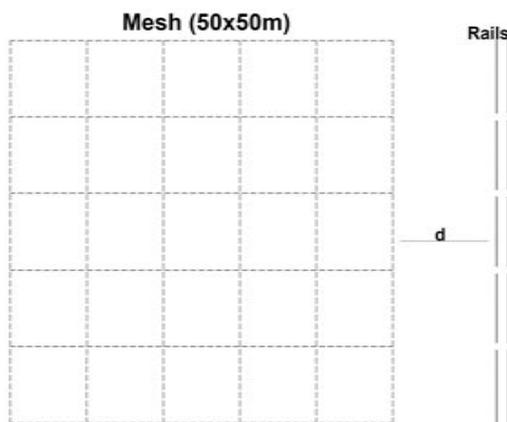


Figura 5. Vista superior de los rieles de la malla

2.1.3. Caso de estudio 3

Se analiza la interferencia mutua de las redes de tierra cercanas para evaluar la circunstancia potencialmente peligrosa en sitios protegidos por la red primaria, incluyendo la proximidad a una adjunta que disipa la corriente de falla a tierra en la tierra circundante, principalmente en áreas urbanas, a) Malla 1 principal y Malla 2 offline, b) Malla 1 primaria y Malla 2 conectada, c) Malla 1 primaria y Malla 2 están conectadas a otros GS.

Se consideran dos mallas del sistema de puesta a tierra, con topología y parámetros técnicos similares. Los ejes adyacentes de las mallas están espaciados una distancia de d metros.

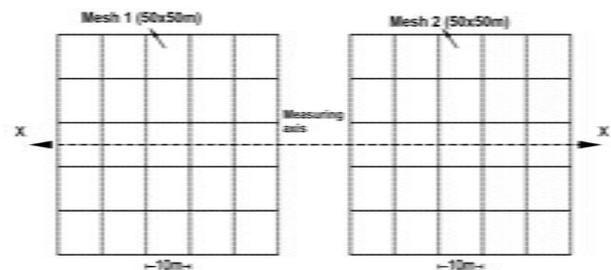


Figura 6. Mallas de puesta a tierras cercanas

2.2. Interferencias entre el GS y la protección catódica

Los estándares y prácticas recomendadas para el diseño de sistemas de protección catódica establecen la necesidad de interconectar estructuras metálicas entre sí. Sin embargo, esta unión equipotencial puede comprometer la protección catódica y la efectividad en la seguridad. Los GS tradicionalmente construidos con electrodos de cobre, debido a sus características de estabilidad a lo largo del tiempo, presentan problemas relacionados con la protección catódica: una malla de tierra de cobre conectada a la estructura bajo protección catódica puede drenar una cantidad considerable de la corriente de protección. Puede ser imposible polarizar correctamente la estructura de acero en escenarios específicos. Si la protección catódica ya no es apropiada, está en riesgo de corrosión debido al acoplamiento galvánico entre el cobre y el acero.

2.3. Impacto de las fallas a tierra en tuberías y posibles soluciones

Los arcos eléctricos destructivos pueden prevenirse conectando los GS con las tuberías. Sin embargo, tal conexión causaría que el sistema de protección catódica drene; esto se resuelve insertando un ISP o una celda de polarización en tal conexión. La corriente de falla conducida por la tubería debe ser disipada a tierra de

manera segura a través de ánodos de sacrificio intencionales desacoplados, como, por ejemplo, materiales de magnesio o zinc, conectados e instalados a lo largo de la tubería con una baja resistividad. Estos ánodos de sacrificio también facilitarían la disipación a tierra de las corrientes conducidas a la tubería desde ubicaciones remotas del área de la subestación.

En vez de unir los conductores, instalar dispositivos de desacoplamiento, tales como aisladores de protección contra sobretensiones entre los electrodos de puesta a tierra y las tuberías, es el mejor compromiso para salvaguardar la seguridad y la funcionalidad durante fallas a tierra. Los desacopladores minimizan el impacto de fallas a tierra en canales mientras preservan la efectividad de la protección catódica.

La seguridad humana depende de la energía absorbida antes de que la falla sea despejada y el sistema sea desactivado; se sugiere establecer los límites de voltaje de contacto y de paso conocidos como umbrales, dependiendo del material utilizado como capa superficial y su factor de reducción, Dalziel y Lee establecen constantes relacionadas con la energía de descarga eléctrica tolerada.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de resultados

3.1.1. Efectos del conductor a tierra de la malla perimetral

No se considera la tubería metálica subterránea; los gráficos de contorno y perfil del gradiente de potencial de los casos se hacen, considerando el piso acabado como el asfalto $\rho_s = 10000 \Omega - m$ (Figuras 7 y 8). La malla de tierra y la valla perimetral sin conexión se muestran en las Figuras 9 y 10.

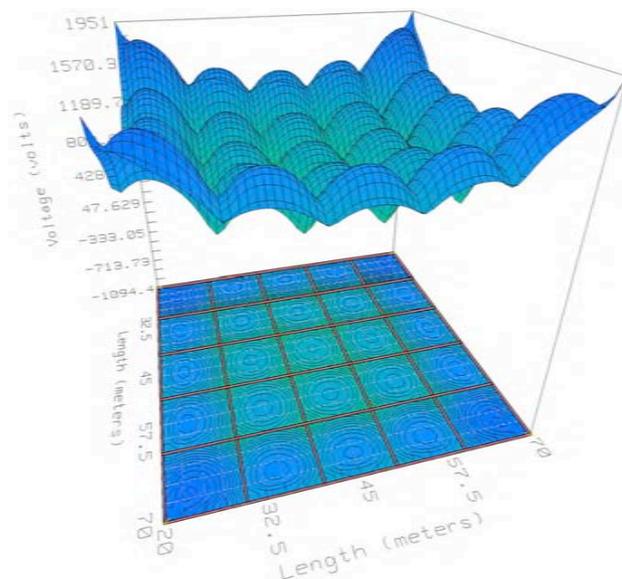


Figura 7. Tensión de contacto, malla aislada- ρ_s de asfalto

Se presenta un resumen de las simulaciones con las condiciones establecidas para el caso de estudio 1, con capas superficiales de concreto, grava y asfalto.

Para un concreto $\rho_s = 200 \Omega - m$, los voltajes umbrales de contacto y paso corresponden a 457,82 V y 730,83 V.

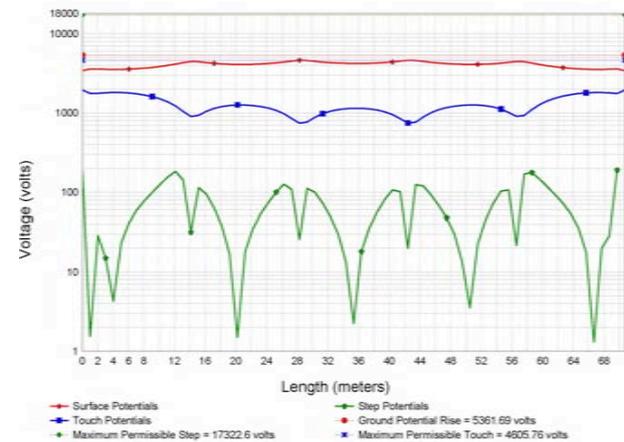


Figura 8. Perfil de potencial de la malla aislada – asfalto ρ_s

Tabla 4. Malla y valla perimetral sin conexión

Casos	MTV_{max}	MSV_{max}	GPG
Malla IM aislada	1951,02	190,26	5361,69
Dirección del perfil 1 PA1	1455,92	119,73	5361,69
Dirección del perfil 2 PA2	3599,08	35,53	5361,69
Malla-Red sin conexión MNWC	1015,99	89,43	3932,32
Dirección del perfil sin conexión 1 PA1NC	873,31	57,63	3932,32
Dirección del perfil sin conexión 2 PA2NC	1392,32	92,61	3932,32

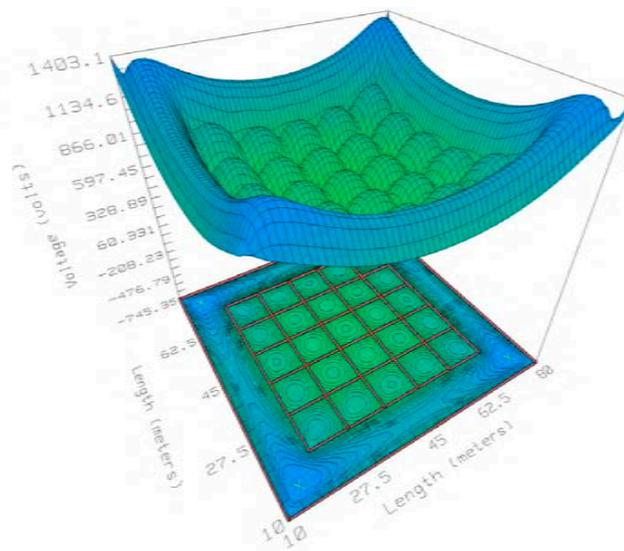


Figura 9. Voltaje de contacto, malla y valla sin asfalto – conexión ρ_s

Cambiando por un piso acabado de grava, $\rho_s = 5000 \Omega - m$, los umbrales de voltaje de contacto y paso varían a 2489,47 V y 8857,39 V; con el cambio a asfalto $\rho_s = 10000 \Omega - m$, los umbrales de voltaje de contacto y paso son 4605,76 V y 17322,6 V. El material usado como capa superficial permite tener una resistencia de malla R_g de 0,476 Ω y para una malla aislada sin conexión cercana a un valor de 0,35 Ω . El máximo voltaje de contacto [MTV, *Maximum Touch Voltage*, por sus siglas en inglés], el máximo voltaje de paso [MSV, *Maximum Step Voltage*, por sus siglas en inglés], y el GPG se muestran en la Tabla 4.

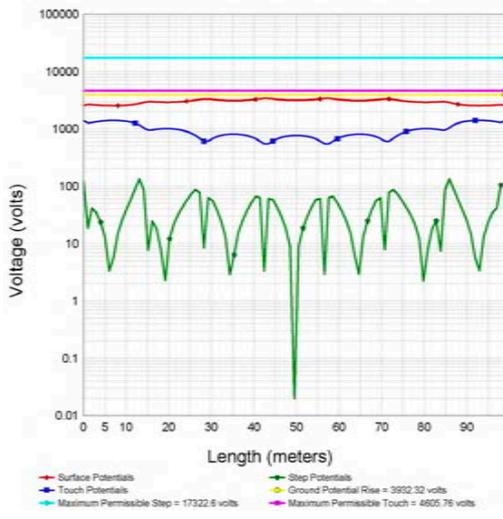


Figura 10. Malla de potencial y perfil de la valla sin asfalto-conexión ρ_s

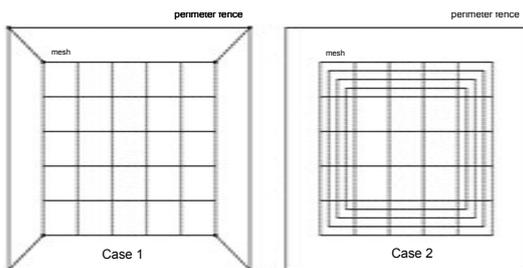


Figura 11. Malla modificada y malla conectada a la valla

De acuerdo con las simulaciones realizadas con diferentes valores de la capa superficial, los umbrales de voltaje de contacto [*Threshold Touch Voltages*, TTV, por sus siglas en inglés] y voltaje de paso [*Threshold Step Voltage*, TSV, por sus siglas en inglés] están directamente relacionados con la resistividad de la capa superficial. El cambio de material en la capa superficial a grava o asfalto permite que el voltaje de contacto, voltaje de paso, GS y R_g varíen en favor de la seguridad del ser humano cuando se implanta la valla perimetral. La capa superficial de concreto permite que el MTV exceda los valores de TTV y TSV, lo cual sugiere mejorar la arquitectura de la malla. Sobre la base de la

malla y a la valla perimetral indicada en la Figura 3, las modificaciones hechas a la arquitectura de la malla para reducir el MTV y el MSV cuando la superficie es $\rho_s = 200 \Omega - m$, sugieren a) sujetar la malla a la valla perimetral, b) modificar la malla, incrementando los lazos en las partes externas (ver Figura 11). En el caso 1, con el cambio de arquitectura, el TTV y TSV corresponden a 457,82 V y 730,83 V, el $R_g = 0.34\Omega$ no varía, y el MTV y MSV, así como también el GS, se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Métrica de malla y perímetro

$\rho_s = 200 \Omega - m$ [concrete]			
Casos	MTV	MSV	GPG
Malla y cerca conectada [MFC]	936,7	83,54	3858,7
Malla modificada sin conexión [MMWC]	851,86	150,73	3836,26

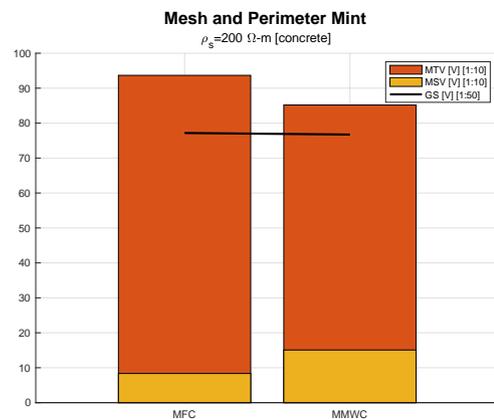


Figura 12. Métrica con cambio en la arquitectura de la malla

3.1.2. Influencia de la malla perimetral

Los resultados permiten observar los efectos de la valla perimetral sobre el MTV, MSV, GPG y R_g : Si el conductor de tierra de la valla perimetral encierra la malla de la subestación, el MTV de la malla disminuye hasta 48 %, y el GS y R_g disminuyen un 27 %. En la Figura 11 se observan las configuraciones más típicas usadas para reducir el voltaje de contacto; en la Tabla 5, el MTV y MSV disminuyen en el caso 1. En el caso 2, con la malla modificada, el MTV disminuye y el MSV aumenta con respecto a los valores indicados en la Tabla 3, cuando hay una malla y una valla sin conexión. Si el GS aumenta, el R_g aumenta; esto es lógico dado que el GS es proporcional a R_g , de acuerdo con su fórmula, $GPG = I_g \cdot R_g$. Cuando el GS aumenta, el voltaje de contacto pico disminuye. En el caso 1, con la malla y la valla conectadas, el máximo valor de voltaje disminuye 8 %, especialmente donde la malla y el riel no están conectados. En el caso 2, con la malla modificada, el máximo voltaje de contacto disminuye

16 % para el caso en el que la malla está presente y la valla está desconectada.

3.1.3. Los efectos de la tubería de metal enterrada

Para analizar los efectos de la tubería sobre la red de tierra, no se toma en cuenta la valla indicada en la Figura 2; se realizan simulaciones de voltaje de contacto, paso y GS en la red y dirección 1. La Tabla 5 corresponde a una tubería de metal de diámetro fijo enterrada a diferentes profundidades, mientras que la Tabla 6 corresponde a una tubería de metal de diámetro variable enterrada a profundidad fija. Se simula un ejemplo de ítem a, con una capa superficial de asfalto para el caso de una tubería de 400 mm de diámetro a una profundidad de 2 m.

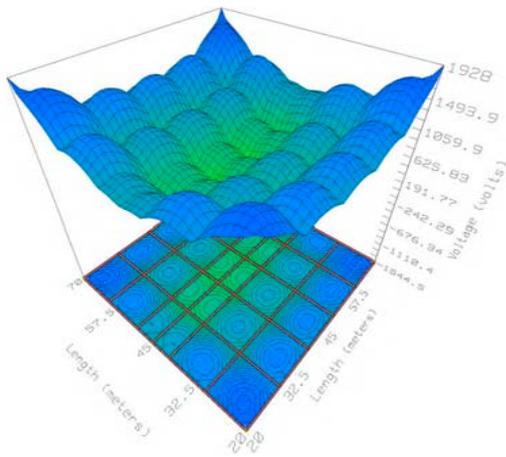


Figura 13. Voltaje de contacto, malla y tubería de asfalto- ρ_s

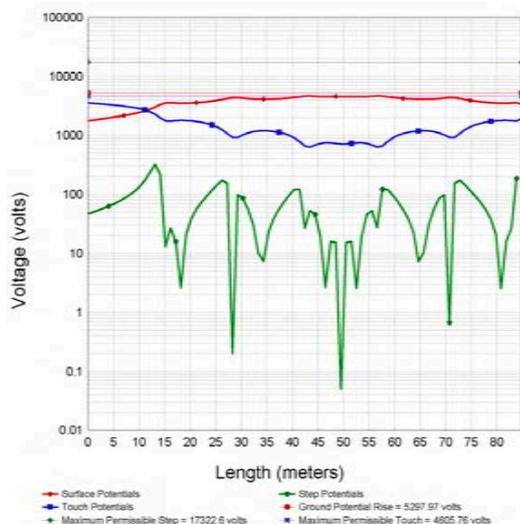


Figura 14. Perfil de potencial en la dirección 1 - malla y tubería - asfalto ρ_s

Se presenta un resumen de las simulaciones realizadas con tuberías de diferentes diámetros, profundidades y capas superficiales de concreto, grava y asfalto; $\rho_s = 200 \Omega - m$ [concreto], tubería de diámetro constante y línea metálica subterránea a profundidades de 2, 3, 4 y 5 m, TTV, y TSV corresponden a 457,82 V y 730,83 V cuando se cambia de escenario. Para la capa superficial de grava [$\rho_s = 5000 \Omega - m$], TTV y TSV varían entre 2489,47 V y 8857,39 V, para el caso de asfalto como capa superficial con $\rho_s = 10000 \Omega - m$, TTV y TSV igual a 4605,76 V y 17322,6 V, R_g se establece en 0,47 Ω . Los voltajes máximos de contacto, paso y PG presentan la variación que se muestra en la tabla.

Tabla 6. Tubería de diámetro constante y profundidad variable

Malla y tubería subterránea (diámetro 400 mm)			
$\rho_s = 200 \Omega - m$ [concrete]			
$\rho_s = 5000 \Omega - m$ [gravel]			
$\rho_s = 10000 \Omega - m$ [asphalt]			
Malla - Tubería 2m [MP2]	1924,62	186	5288,62
Dirección del perfil 11 [PD11]	1053,52	113,23	5288,62
Malla - Tubería 3m [MP3]	1911,75	184,93	5263,10
Dirección del perfil 12 [PD12]	1090,21	112,56	5263,10
Malla - Tubería 4m [MP4]	1897,24	183,78	5235,02
Dirección del perfil 13 [PD13]	1114,58	111,75	5235,02
Malla - Tubería 5m [MP5]	1881,5	182,56	5204,92
Dirección del perfil 14 [PD14]	1131,21	110,75	5204,92

$\rho_s = 200 \Omega - m$ [concreto], tubería con diámetro variable iguales a 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 m y profundidad constante, TTV y TSV iguales a 457,82 V y 730,83 V, se utiliza grava con $\rho_s = 5000 \Omega - m$ como capa superficial, TTV y TSV iguales a 2489,47 V y 8857,39 V. Para el escenario con asfalto como capa superficial, con $\rho_s = 10000 \Omega - m$, el resultado corresponde a 4505,76 V y 17322,6 V, indicando que $R_g = 0,47 \Omega$, MTV, MSV y PG presentan la variación que se muestra en la Tabla 7.

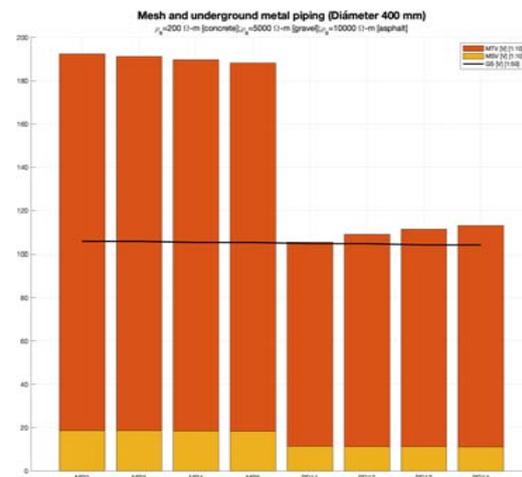


Figura 15. Métrica de malla y tubería metálica subterránea

Tabla 7. Tubería de diámetro variable y profundidad constante- ρ concreto

Malla y tubería metálica subterránea (2m)
 $\rho_s = 200 \Omega - m$ [concrete]
 $\rho_s = 5000 \Omega - m$ [gravel]
 $\rho_s = 10000 \Omega - m$ [asphalt]

Casos	MTV	MSV	GPG
Malla - Tubería \varnothing 0,8m [MP0,8]	1920,08	185,26	5276,08,62
Dirección del perfil 11 [PD11]	998,72	112,12	5276,08
Malla - Tubería \varnothing 0,6m [MP0,6]	1922,13	185,59	5261,76
Dirección del perfil 12 [PD12]	1018,71	112,62	5261,76
Malla - Tubería \varnothing 0,4m [MP0,4]	1924,62	186	5288,62
Dirección del perfil 13 [PD13]	1053,62	113,23	5288,62
Malla - Tubería \varnothing 0,2m [MP0,2]	1927,98	186,54	5297,97
Dirección del perfil 14 [PD14]	1104,79	114,06	5297,97

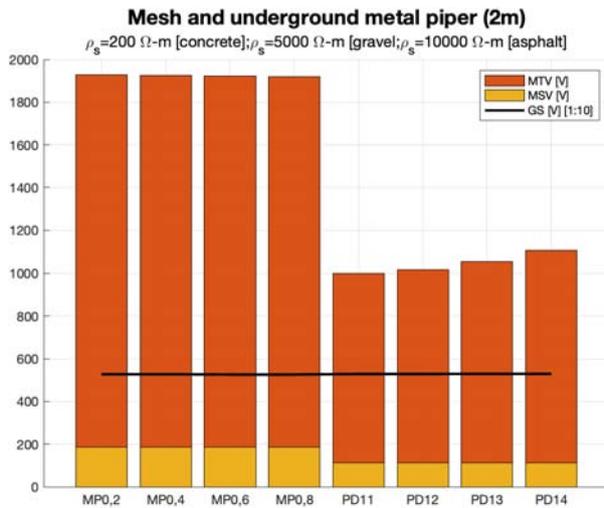


Figura 16. Visualización de valores de la Tabla 8

En presencia de una tubería metálica subterránea que cruza por debajo de la malla, con diámetro constante y profundidad variable, MTV y MSV disminuyen a medida que aumenta la profundidad, mientras que R_g y GS lo hacen a menor escala. Si su diámetro es variable y su profundidad constante, MTV y MSV aumentan cuando el diámetro de tubería disminuye, y R_g y GS aumentan en menor escala. En la Figura 3 se proponen diferentes escenarios, manteniendo constante los parámetros de la malla, diámetro y profundidad variable; el objetivo de estas configuraciones es determinar qué estrategia es más favorable para la disminución de TTV y TSV que puedan generarse en el área superficial de la tubería cuando ocurre una falla en el sistema eléctrico.

3.1.4. Análisis de resultados de tuberías metálicas subterráneas

Se toman como referencia los voltajes MTV [457,82 V] y MSV [730,83 V] del caso 1 indicados en la Tabla 1, donde se recomienda instalar más conductores en la malla de tierra paralelos a la tubería subterránea que pasa debajo; esto ayuda a disminuir TTV y TSV en la

malla, debido al incremento de los campos electromagnéticos. Otra manera de reducir TTV y TSV es hacer que la tubería cruce diagonalmente tanto como sea posible. Un análisis exhaustivo sugiere que las tuberías subterráneas dejan un área en la subestación eléctrica porque las transferencias de voltaje generan valores de GPG y TTV más altos que los admisibles para su configuración. En estos casos se recomienda instalar barras de soldadura de cobre conectadas al inicio y al final de la tubería.

De acuerdo con estudios realizados en la tubería metálica, es posible observar que esto afecta el potencial de la malla. Dentro del área de la red, la tubería metálica enterrada disminuye el TTV y TSV; esto no ocurre en situaciones reales, porque las tuberías siempre entran y salen del área de la red de tierra. Cuando una tubería metálica sale o está fuera del área de la malla, causa una elevación de TTV y GPG en regiones fuera de la malla; esto es lógico debido a que, al aumentar la longitud de la tubería, el incremento en potencial se aproximará al aumento en potencial de la red. Cuando ocurre una falla en el sistema eléctrico, se genera una corriente en la tubería; esto aumenta cuando la tubería está más lejos. Los escenarios presentados con las tuberías metálicas enterradas muestran claramente el peligro de los potenciales transferidos. Para los diseños de GS, en subestaciones eléctricas, deben tomarse medidas correctivas cuando hay estructuras metálicas cercanas; el diseñador debe conocer su influencia con precisión aceptable; de lo contrario, pueden aplicar medidas erróneas o injustificadas.

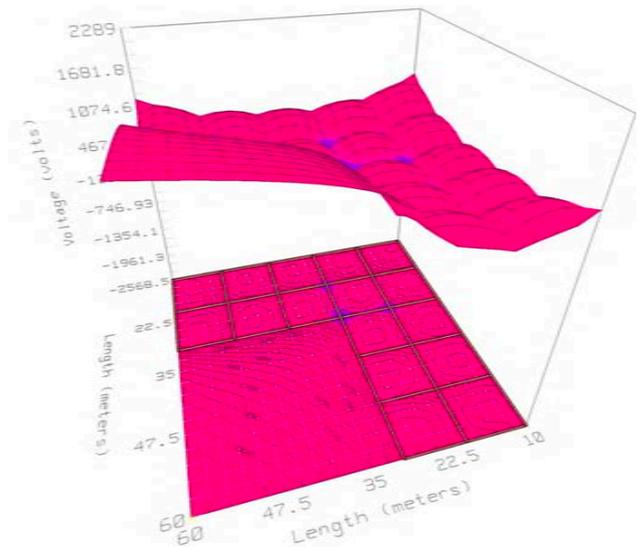


Figura 17. Voltaje de contacto para una malla asimétrica- ρ_s concreto

De acuerdo con buenas prácticas de ingeniería, los procedimientos correctivos se aplican para minimizar la transferencia de potencial cuando las estructuras metálicas están enterradas. Sin embargo, al unir la

estructura metálica a la malla principal se verifica cuidadosamente el procedimiento mencionado, debido a la posible transferencia del incremento en el potencial de las redes [situación inversa]. Proporcione mallas más densas para la red sobre la tubería enterrada. En algunos casos, estas mallas pueden actuar como una malla protectora reduciendo la magnitud del voltaje de contacto. Instale bridas aislantes en las tuberías metálicas subterráneas en ubicaciones apropiadas. La solución óptima en los métodos correctivos a ser utilizadas dependerá de varios factores, tales como las propiedades del suelo, la ubicación de la estructura metálica, y la corriente de falla, entre otros.

3.1.5. Malla tipo L

En la Figura 4 se presenta un estudio del GS de una malla asimétrica; para este caso, se considera una capa superficial de resistividad $\rho_s = 200 \Omega - m$ [concreto], obteniéndose los valores mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Malla asimétrica tipo L

Casos	Malla asimétrica tipo L $\rho_s = 200 \Omega - m$ [concrete]					
	MTV	MSV	TTV	TSV	$R_g \Omega$	GPG [V]
Malla aislada	457,82	2288,99	730,83	132,11	0,56	3168

En el caso expuesto se observa que, con la capa superficial de concreto, el MTV excede al MSV; en la Figura 16, los procedimientos para mejorar el TTV son los mismos que los expuestos en mallas simétricas o asimétricas

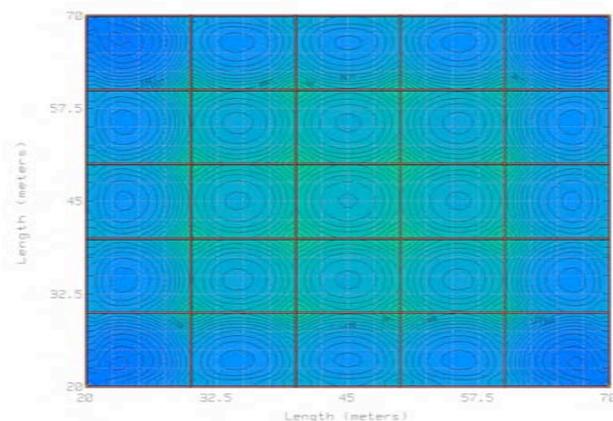


Figura 18. Contorno del potencial de malla – sin rieles

3.1.6. Análisis de resultados del escenario 2

Se consideran una malla y rieles cercanos, utilizando la configuración de la malla indicada en la Figura 3. El estudio se hace basado en lo que se muestra en la Figura 5, y se considera una capa superficial del asfalto.

3.1.7. Caso 2.1 Red de tierra sin considerar rieles cercanos

Se hace un análisis del contorno de potencial de la red de tierra sin considerar los rieles; la Figura 18 muestra la distribución de potencial en la superficie de tierra cuando ocurre una condición de falla.

3.1.8. Caso 2.2 Red de tierra considerando rieles sin conexión a la red

Se propone analizar el contorno de potencial de la red de tierra, considerando los rieles a una distancia [$d = 30$ m] sin conexión; esta es una situación común en subestaciones y plantas eléctricas, y la simulación de los rieles se hace a través de conductores de acero revestidos de aluminio de 90 mm de diámetro, separados una distancia de 1,5 m y con una longitud de 50 m (Figura 19).

3.1.9. Caso 2.3 Red de tierra considerando rieles conectados a la red

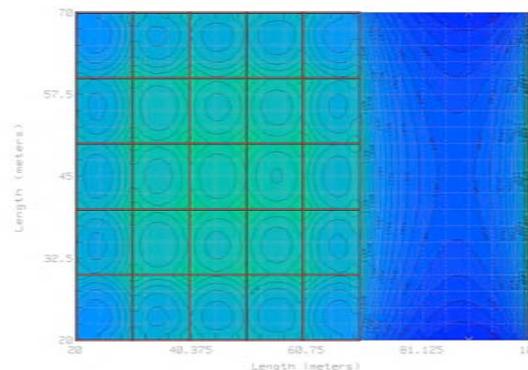


Figura 19. Contornos de potencial de la malla con rieles

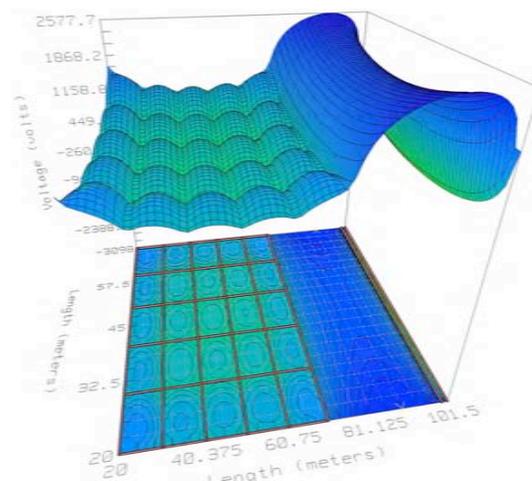


Figura 20. Voltaje de contacto para malla y rieles sin conexión

Se presenta como caso de estudio los contornos de potencial de la red de tierra, considerando los rieles conectados a ella empleando cables AWG 4/0 de cobre en 5 puntos uniformemente distribuidos en los rieles (ver Figura 20). Las Figuras 17, 18, y 19 muestran el cambio en las curvas de potencial cuando se instalan los rieles; las diferencias más importantes pueden verse en la distribución de potencial en los alrededores, dado que se generan altos GS para ser considerados. Las Figuras 19 y 20 muestran que los valores de TTV aumentan en el área entre los rieles y la malla cuando ellos no están conectados; ellos se unen con la malla para reducir estos potenciales (ver Figuras 21 y 22).

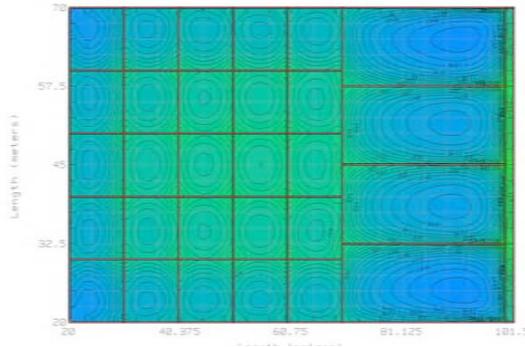


Figura 21. Contornos del potencial de la malla con los rieles conectados

Tabla 9. Tubería de diámetro variable y profundidad constante - ρ concreto

MMalla y rieles (diámetro de los rieles 90 mm, profundidad 10 mm)
 $\rho_s = 10000 \Omega \cdot m$ [asphalt]

Item	Casos	MTV	MSV	GPG
1	Malla aislada [IM]	1951,02	190,26	5361,69
2	Rieles de potencial [PR1]	3984,13	9,57	5361,69
3	Malla y rieles sin conexión 1 [MRWC1]	1651,47	152,99	4606,32
4	Rieles de potencial [PR2]	1739,38	576,69	4606,32
5	Malla - Tubería \varnothing 0,4m [MP0,4]	1924,62	186	5288,62
6	Rieles de potencial [PR3]	717,73	227,69	4201,47
7	Malla y rieles sin conexión 2 [MRWC2]	1671,74	155,12	4657,38
8	Rieles de potencial aislados [PRA]	1606,9	756,61	4657,38

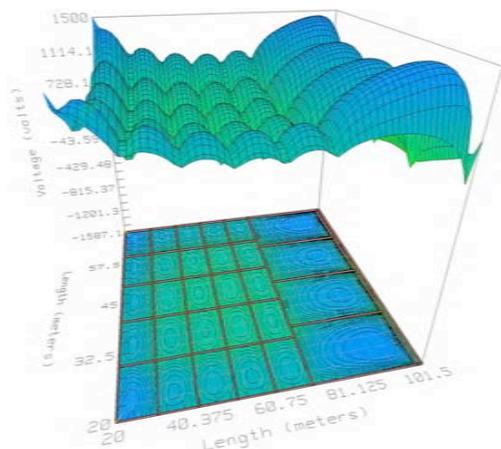


Figura 22. Voltaje de contacto de la pantalla y los rieles conectados

Si los rieles no están conectados a la malla, los valores de TTV y TSV son altos (ver Tabla 9, ítem 2); si están conectados a la red estos disminuyen, así como también los valores de GP and R_g . Otra manera de reducir los potenciales en los rieles cuando estos no están conectados a la malla es aislar las juntas de las uniones (ver Tabla 9, ítem 8); de la misma manera, los rieles pueden ser puestos a tierra utilizando barras de metal o soldadura de cobre.

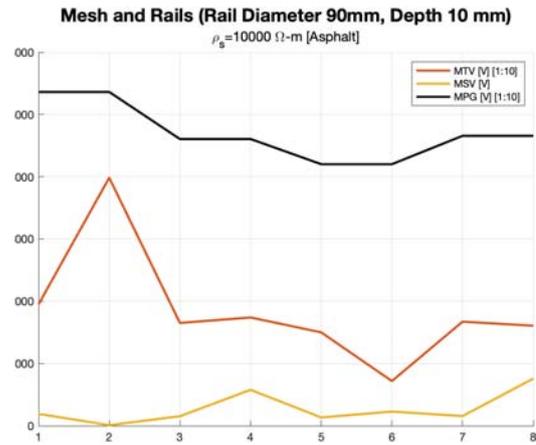


Figura 23. Visualización de los valores de la Tabla 6

3.1.10. Análisis de resultados del Escenario 3

Se consideran las mallas 1 y 2; Figura 6, se usa la configuración de malla indicada en la Figura 3 con una capa superficial de grava y una corriente de cortocircuito de 10 kA.

3.1.11. Malla 1 y Malla 2 sin conexión

Cuando ocurre una falla eléctrica en la malla 1, esta afecta a la malla 2 debido a la diferencia entre el potencial de la superficie de tierra y el potencial de la malla 2; la simulación para las dos mallas se hace variando su distancia, desde 10 hasta 120 metros, obteniendo TTV = 2489,47 V y TSV = 8857,39 V.

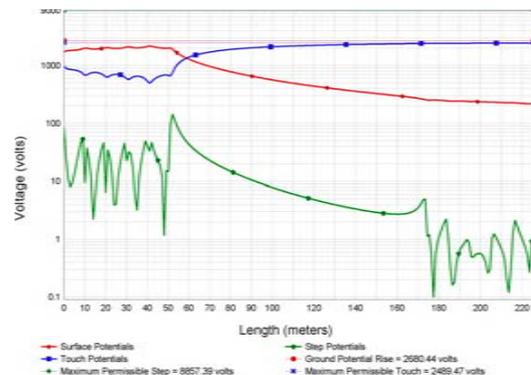


Figura 24. Voltajes de contacto y paso en el eje de medición de las mallas. Malla 1 y Malla 2 sin conexión

Tabla 10. Voltajes de contacto y paso, R_g GPG – Malla aislada

d(m)	Malla 1				Malla 2			
	Voltaje máximo		$R_g\Omega$	GPG	Voltaje máximo		$R_g\Omega$	GPG
	Touch	Step	V	Touch	Step	V	V	
10	980,754	96,58	0,468	2636,63	2054,55	22,64	0,468	734,951
20	978,146	95,8	0,473	2661,43	2165,5	14,71	0,473	607,649
30	976,994	95,49	0,474	2670,57	2234,7	10,86	0,474	522,136
40	976,354	95,33	0,475	2674,82	2284,7	8,44	0,475	409,968
50	976,009	95,26	0,476	2677,06	2323,38	6,77	0,476	409,968
60	975,806	95,21	0,476	2678,34	2354,56	5,56	0,476	370,686
70	975,693	95,18	0,476	2679,11	2380,38	5,64	0,476	382,68
80	975,629	95,17	0,476	2679,61	2420,21	3,93	0,476	311,425
90	975,588	95,16	0,476	2679,94	2420,96	3,41	0,476	288,475
100	975,554	95,14	0,476	2680,16	2437,25	3,99	0,476	268,717
110	975,543	95,14	0,476	2680,32	2451,58	2,65	0,476	251,521
120	975,528	95,14	0,476	2680,4	2464,27	2,36	0,476	236,414

El MTV generado por la malla 1 en la malla 2 crece a medida que se alejan, alcanzando su máximo valor de 2464,27 V a una distancia de 120 m; por otra parte, el MSV disminuye a medida que se alejan. En las mallas 1 y 2, los valores de R_g se mantienen para todas las distancias de separación, mientras que en la malla 2 el GPG disminuye a medida que ellas se alejan. En la línea del eje de medición, se elabora un gráfico de los voltajes de contacto y paso para las redes aisladas 1 y 2, para una distancia $d = 30$ m (Figura 24).

3.1.12. Malla 1 y Malla 2 conectadas

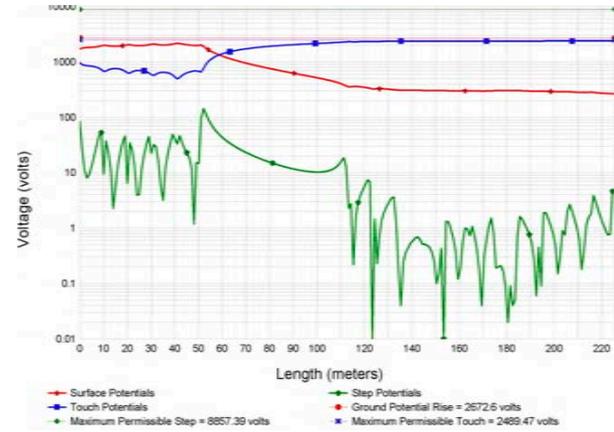
Si las mallas 1 y 2 están conectadas, las corrientes de fuga son las mismas, y se generan voltajes potencialmente peligrosos debido a su simetría geométrica. Estas mallas pueden ser conectadas intencionalmente o no a través de varias instalaciones de metal, tales como cables, tuberías o rieles.

Tabla 11. Voltajes de contacto y paso, R_g , GPG. Mallas 1 y 2 conectadas

d(m)	Malla 1				Malla 2			
	Voltaje máximo		$R_g\Omega$	GPG	Voltaje máximo		$R_g\Omega$	GPG
	Touch	Step	V	Touch	Step	V	V	
10	600,808	52,99	0,307	1731,01	600,808	54,4	0,307	1731,01
20	576,057	51,15	0,296	1668,63	576,057	53,41	0,296	1668,63
30	557,325	49,72	0,287	1619,07	557,325	51,84	0,287	1619,07
40	542,037	48,53	0,28	1577,25	542,037	50,55	0,28	1577,25
50	526,901	47,48	0,273	1540,53	526,901	49,42	0,273	1540,53
60	517,206	46,51	0,268	1507,44	517,206	48,38	0,268	1507,44
70	506,565	45,63	0,262	1477,04	506,565	47,44	0,262	1477,04
80	496,696	44,79	0,257	1448,7	496,696	46,54	0,257	1448,7
90	487,437	43,99	0,252	1422,2	487,437	45,7	0,252	1422,2
100	478,677	43,22	0,248	1397,06	478,677	44,89	0,248	1397,06
110	514,775	47,22	0,263	1481,65	514,775	48,88	0,263	1481,65
120	462,371	41,78	0,24	1350,29	462,371	43,37	0,24	1350,29

Se considera que la conexión de las dos mallas se hace utilizando un cable aislado con las mismas características que aquellos que conforman las mallas respectivas, obteniendo similitud entre MTV y MSV en ambas mallas (ver Tabla 10). En una falla eléctrica, los valores de voltaje se reflejan en la malla 2. Esto indica la necesidad de un análisis exhaustivo; antes de conectar intencionalmente la 1 con la 2, es necesario verificar si las medidas de seguridad aplicadas en las instalaciones de la malla 2 pueden desarrollar voltajes y corrientes a tierra de valores peligrosos. Por otra

parte, la conexión paralela de las mallas del sistema de puesta a tierra disminuye las corrientes a tierra y el TTV asociado con la malla 1. Las métricas del TTV y TSV a una distancia $d = 30$ m se muestran en la Figura 25.

**Figura 25.** Voltajes de contacto y paso en el eje de medición de las mallas. Malla 1 y Malla 2 conectadas

3.1.13. Malla 1 y Malla 2 sin conexión – Malla 2 subterránea

Las estaciones, fuente de transformadores de distribución, están frecuentemente ubicadas cerca de los edificios circundantes en áreas urbanas. Por otra parte, los GS son frecuentemente interconectados intencionalmente o sin intención; por lo tanto, ellos tienden a tener una R_g muy baja. Es esencial evaluar los voltajes potencialmente peligrosos que pueden aparecer en la red de tierra del edificio adyacente más cercano a la subestación.

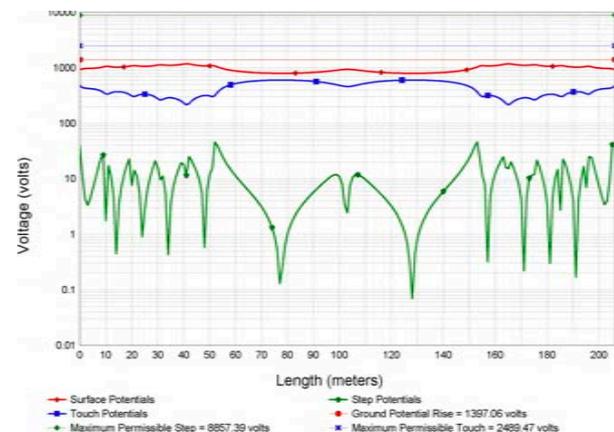
**Figura 26.** Voltajes de contacto y paso en el eje de medición. Malla 1 y Malla 2 aisladas – Malla 2 aterrada

Tabla 12. Voltajes de contacto y paso, R_g , GPG. Mallas 1 y 2 aterradas

d(m)	Malla 1				Malla 2			
	Voltaje máximo		$R_g\Omega$	GPG	Voltaje máximo		$R_g\Omega$	GPG
	Touch	Step	V	Touch	Step	V	V	
10	989,093	98,77	0,46	2589,35	2101,29	31,52	0,46	549,539
20	981,739	96,67	0,46	2638,14	2202,31	20,62	0,46	483,27
30	978,94	95,97	0,474	2656	2268,01	15,1	0,474	423,433
40	977,658	95,68	0,474	2663,49	2320,62	12,7	0,474	367,376
50	976,7981	95,47	0,474	2669,13	2355,08	10,32	0,474	333,388
60	976,309	95,36	0,474	2672,6	2382,59	8,57	0,474	305,593

Se calcula el potencial de distribución en la superficie de tierra de la red 1, donde se ubica la subestación fuente de distribución, y la red 2, que representa la red de tierra del edificio más cercano a la subestación. Los cálculos se hacen suponiendo que la malla de tierra del edificio está conectada a las mallas de tierra de los edificios circundantes; se supone que las mallas de las estructuras tienen las mismas características y parámetros técnicos que la malla 1. La simulación de las dos redes se hace variando su distancia, entre 10 y 60 metros, obteniendo TTV = 2489,47 V y TSV = 8857,39 V. En las áreas urbanas, el MTV en el edificio vecino para $d = 30$ m presenta valores altos; sin embargo, los voltajes de paso en el espacio entre la subestación y la instalación adjunta son más altos para las redes conectadas. La transferencia de potenciales peligrosos y los parámetros técnicos de la malla y la tierra dependen principalmente del valor de la corriente de falla. Una distancia considerable entre mallas cercanas no garantiza una disminución en la transferencia de potenciales peligrosos. En las subestaciones eléctricas, el valor de resistividad de la capa superficial es un parámetro importante a tomar en cuenta; su valor influye directamente los valores de TTV y TSV de la subestación y, por lo tanto, los gradientes de potencial transferidos.

4. Conclusioness

A partir de los escenarios presentados en este estudio con variables de resistividad de la capa superficial y diferentes configuraciones, se ha determinado la variación del GPG para varias estrategias. Se han relacionado y evaluado los parámetros técnicos que aparecen en los diseños de GS, observando cómo estos influyen sobre el GPG.

Este artículo presenta la simulación y el análisis de escenarios reales de transferencia de potencial entre subestaciones eléctricas y estructuras metálicas. Sobre la base de ellos, se han obtenido los resultados que reflejan los valores de transferencias peligrosas de voltajes a estructuras metálicas cerca de una subestación, excediendo los valores de TTV y TSV permitidos en un GS. Se indican las medidas y procedimientos tomados en cuenta para reducir los voltajes de transferencia en el diseño y construcción de GS.

Los valores de corriente de corto circuito, resistividad del suelo, distancias y ubicación entre estructuras metálicas cercanas, entre otros parámetros de diseño, influyen sobre las transferencias de potenciales eléctricos entre una subestación y las estructuras metálicas adjuntas. Es esencial considerar el GPG generado en un GS fuera del área de la subestación, los efectos de interferencia de potenciales generados por la existencia de estructuras metálicas, y los GS cercanos a la subestación.

En redes cercanas, se hizo un análisis de situaciones potencialmente peligrosas que pueden aparecer cuando se transfieren los potenciales generados por las corrientes de falla a tierra a las redes y al equipo de tierra cercano y al personal protegido por ellos. En el diseño de sistemas de protección catódica para tuberías en estaciones de petróleo, se evitan tanto como sea posible las interferencias de los GS conectados a la red de la subestación con los sistemas de protección catódica. De lo contrario, el problema debe profundizarse, proponiendo soluciones apropiadas a esta interferencia, lo cual prevendría comprometer la efectividad del sistema de protección catódica.

Se realiza un análisis detallado de los escenarios cuando la red está cerca de otros objetos puestos a tierra; estas circunstancias son necesarias para instalar subestaciones en áreas urbanas. El análisis realizado en el documento ha mostrado que las fallas a tierra en una conexión no intencional de redes de tierra, puede causar altos TTV y TSV en mallas cercanas que puede llevar a riegos severos para el ser humano que las conduce.

Referencias

- [1] J. Nahman and D. Salamon, "Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation," *Electric Power Systems Research*, vol. 151, pp. 166–173, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.05.029>
- [2] L. Fu, "The influence of Urban Substation on Neighbouring Metal Grounding System," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1176, no. 4, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1176/4/042051>
- [3] L. Neamt, H. Balan, O. Chiver, and A. Hotea, "Considerations about Substation Grounding System Design," in *Proceedings of 2019 8th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759737>
- [4] M. L. Di Silvestre, L. Dusonchet, S. Favuzza, S. Mangione, L. Mineo, M. Mitolo, E. R. Sanseverino, and G. Zizzo, "On the Interconnections of

- HV-MV Stations to Global Grounding Systems,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 2, pp. 1126–1134, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2875383>
- [5] G. Aiello, S. A. Rizzo, S. Alfonzetti, and N. Salerno, “Computation of Transferred Potentials from Grounding Grids by Means of Hybrid Methods,” in *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IEEEIC.2018.8493916>
- [6] L. Popović, “Preliminary testing and assessment of safety conditions of HV substations located in urban areas,” *Electric Power Systems Research*, vol. 195, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107111>
- [7] C. Martineac and R. N. Hasanah, “Influence of soil resistivity on substations earth grounding system,” in *Proceedings of 2019 8th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759796>
- [8] G. Cafaro, P. Colella, P. Montegiglio, E. Pons, R. Tommasini, F. Torelli, and G. Valtorta, “Ground Resistance of Buried Metallic Parts in Urban Areas: An Extensive Measurement Campaign,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 6, pp. 5209–5216, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2748502>
- [9] W. A. Byrd, “Below Grade Coated Direct Imbedded Steel Pole Corrosion Failures With Solutions,” *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 41–46, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JPETS.2018.2884974>
- [10] Q. Lv, Z. Xiang, X. Li, J. Ai, S. Liu, and C. Zhang, “Research on overvoltage protection strategy of oil-gas pipeline based on non-metallic grounding material,” in *2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid, IGBSG 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, pp. 97–102. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IGBSG.2019.8886338>
- [11] S. A. H. Mohammed and I. M. Abdulbaqi, “Numerical Study and Design of an Impressed Current Cathodic Protection System for Buried Metallic Pipes,” in *2018 3rd Scientific Conference of Electrical Engineering, SCEE 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 95–100. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SCEE.2018.8684076>
- [12] E. Inga and R. Hincapié, “Creación de artículos académicos basados en minería de datos y Web 2.0 para incrementar la producción científica en ingeniería,” *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 10, no. 20, pp. 65–74, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3MX1Woz>
- [13] T. H. Shabangu, P. Shrivastava, B. T. Abe, K. B. Adedeji, and P. A. Olubambi, “Influence of AC interference on the cathodic protection potentials of pipelines: Towards a comprehensive picture,” in *2017 IEEE AFRICON: Science, Technology and Innovation for Africa, AFRICON 2017*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 597–602. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/AFRCON.2017.8095549>
- [14] G. Liu, G. Jiang, Z. Zhang, D. Mei, and Y. Zheng, “Research on the influence of DC current overflowing on grounding electrode corrosion,” in *Proceedings of 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, ITOEC 2017*, vol. 2017-Janua. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 291–295. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ITOEC.2017.8122438>
- [15] M. G. Mahlobo, P. Mjwana, M. N. Tladi, B. A. Obadele, P. A. Olubambi, and P. Refait, “Evaluation of cathodic protection performance of carbon steel pipeline buried in soil: A review,” in *2018 IEEE 9th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT 2018*, vol. 2018-Janua. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 37–43. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICMIMT.2018.8340417>
- [16] B. Zhang, F. Cao, X. Meng, Y. Liao, and R. Li, “Numerical approach of impressed potential on buried pipelines near high-voltage DC grounding electrodes,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 5, pp. 1177–1182, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1436>
- [17] F. Babaghayou, B. Zegnini, and T. Seghier, “Experimental model investigation of the corrosion of buried steel pipelines with cathodic protection near high voltage power lines,” *Proceedings of 2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2016*, pp. 1–6, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CISTEM.2016.8066812>

- [18] H. Xuedong, Y. Wei, L. Xinghua, S. Xiangping, and H. Xuyin, "Analysis of grounding status of substation secondary system and improvement measures," in *China International Conference on Electricity Distribution, CIGED*, 2018, pp. 1479–1483. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CIGED.2018.8592194>
- [19] M. Di Silvestre, L. Dusonchet, S. Favuzza, S. Mangione, L. Mineo, M. Mitolo, E. Sanseverino, and G. Zizzo, "Interconnections criteria of grounding grids in global grounding systems," in *Conference Record - Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, vol. 2018-May, 2018, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICPS.2018.8369974>
- [20] R. Pereira Sodre, B. Lopes Pereira, L. Leite Sidrim, J. F. Almeida, and C. L. S. Souza Sobrinho, "Optimization of Grounding Grids Design for a Square-Shaped Mesh," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 1, pp. 135–139, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8291465>
- [21] C. Payshetti, H. Jadhav, and S. Kulkarani, "Analysis of grounding grid of substation," in *Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2017*, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICPCT.2017.8074259>
- [22] I. Kasim, S. Abduh, and N. Fitryah, "Grounding system design optimization on 275 KV betung substation based on IEEE standard 80-2000," in *QiR 2017 - 2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017-Decem. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 400–407. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/QIR.2017.8168519>
- [23] M. D. Kavimandan and A. M. Silva, "Impacts of Existing Infrastructure on Soil Resistivity," *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, vol. 2020-Octob, pp. 20–23, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TD39804.2020.9299899>
- [24] A. Raizer, W. Valente, and V. L. Coelho, "Development of a new methodology for measurements of earth resistance, touch and step voltages within urban substations," *Electric Power Systems Research*, vol. 153, pp. 111–118, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.01.025>
- [25] M. Abdaldaim, P. Wang, and L. Li, "The design of 110kV substation grounding grid with high resistivity soil," in *2017 IEEE 6th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, APCAP 2017 - Proceeding*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 1–3. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/APCAP.2017.8420847>
- [26] X. Wu, V. Simha, R. J. Wellman, M. Thakur, and S. S. Dimpfl, "Substation Grounding Study Input Parameter Sensitivity Analysis and Simulation Strategies," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 3. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, pp. 2272–2280. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2885475>
- [27] D. S. Gazzana, A. B. Tronchoni, R. C. Leborgne, M. Telló, and A. S. Bretas, "Numerical Technique to the Evaluation of Multiple Grounding Electrodes Coupled by the Soil in High Voltage Substations," in *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IEEEIC.2019.8783554>
- [28] C. Gomes and M. Izadi, "Electrical Isolation of Two Earthing Systems under Lightning Conditions with TiO₂ Nano Fluid Barrier," *2019 15th International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2019*, no. October, pp. 1–5, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SIPDA47030.2019.8951640>
- [29] P. R. Bonda and M. K. Mishra, "Optimized Design of Earthing System for Substations with High Soil Resistivity and Limited Plot Area," in *2018 20th National Power Systems Conference, NPSC 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/NPSC.2018.8771780>
- [30] M. Salam, Q. Rahman, S. Ang, and F. Wen, "Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 290–297, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40565-015-0153-8>
- [31] C. Cardoso, L. Rocha, A. Leiria, and P. Teixeira, "Validation of an integrated methodology for design of grounding systems through field measurements," in *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, 2017, pp. 897–901. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0452>

- [32] K. P. Sengar and K. Chandrasekaran, “Designing of cost minimum substation grounding grid system using DE, SCA, and HDESCA techniques,” *IET SCIENCE MEASUREMENT & TECHNOLOGY*, vol. 13, no. 9, pp. 1260–1267, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2019.0021>
- [33] M. Campaña, P. Masache, E. Inga, and D. Carrión, “Estabilidad de tensión y compensación electrónica en sistemas eléctricos de potencia usando herramientas de simulación,” *Ingenius*, vol. 2, no. 1, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.07>
- [34] M. H. Elmashtoly, H. I. Anis, and A. Emam, “Mitigating Hazardous Potentials Near Pipelines Using Passive Grounding Grids,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 121 957–121 963, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109309>
- [35] L. Amaya and E. Inga, “Location of Harmonic Distortions in Electrical Systems using Compressed Sensing,” *Ingeniería y Competitividad*, vol. 24, no. 1, p. 15, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3x4zqI>
- [36] N. Permal, M. Osman, A. M. Ariffin, and M. Z. Abidin Ab Kadir, “Effect of non-homogeneous soil characteristics on substation grounding-grid performances: A review,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 16, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app11167468>
- [37] P. Musil, P. Mlynek, J. Slacik, and J. Pokorny, “Simulation-based evaluation of the performance of broadband over power lines with multiple repeaters in linear topology of distribution substations,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 19, pp. 1–24, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app10196879>
- [38] B. Anggoro, R. S. Utami, and L. Handayani, “Optimal Design of Grounding System Substation, Case Study : 275/150 kV Sigli Substation,” *Proceedings of the 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems: Towards Sustainable and Reliable Power Delivery, ICHVEPS 2019*, vol. 1, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011064>
- [39] X. Tian, Z. Lan, F. Huo, Z. Huang, S. Huang, Y. Ding, J. Geng, X. Yan, and Y. Liu, “Calculation of electric field on substation equipment considering AC Ion flow field,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2020/3914872>
- [40] Z. G. Datsios and P. N. Mikropoulos, “Safety performance evaluation of typical grounding configurations of MV/LV distribution substations,” *Electric Power Systems Research*, vol. 150, pp. 36–44, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.04.016>
- [41] Z. Liu, W. Shi, and B. Zhang, “Numerical analysis of transient performance of grounding grid with lightning rod installed on multi-grounded frame,” *Energies*, vol. 14, no. 12, pp. 1–13, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14123392>
- [42] V. P. Androvitsaneas, K. D. Damianaki, C. A. Christodoulou, and I. F. Gonos, “Effect of soil resistivity measurement on the safe design of grounding systems,” *Energies*, vol. 13, no. 12, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13123170>
- [43] B. Küchler, U. Schmidt, and J. Hänsch, “Harmonic current distribution in grounding systems of cabled medium voltage grids during single-pole ground fault,” *Energies*, vol. 14, no. 4, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14041110>
- [44] F. Sinchi-Sinchi, C. Coronel-Naranjo, A. Barragán-Escandón, and F. Quizhpi-Palomeque, “Soil Treatment to Reduce Grounding Resistance by Applying Low-Resistivity Material (LRM) Implemented in Different Grounding Systems Configurations and in Soils with Different Resistivities,” *Applied Sciences*, vol. 12, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app12094788>
- [45] F. Holik, L. H. Flå, M. G. Jaatun, S. Y. Yayilgan, and J. Foros, “Threat Modeling of a Smart Grid Secondary Substation,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 6, pp. 1–21, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics11060850>



LOCALIZACIÓN DE RECURSOS DISTRIBUIDOS EN REDES ELÉCTRICAS RURALES-URBANAS MARGINALES, CONSIDERANDO EL ÍNDICE DE PREDICCIÓN DE COLAPSO DE TENSIÓN

LOCATION OF DISTRIBUTED RESOURCES IN RURAL-URBAN MARGINAL POWER GRIDS CONSIDERING THE VOLTAGE COLLAPSE PREDICTION INDEX

Anabel Lemus¹ , Diego Carrión^{2,*} , Eduar Aguirre³ , Jorge W. González⁴

Recibido: 01-06-2022, Recibido tras revisión: 20-06-2022, Aceptado: 22-06-2022, Publicado: 01-07-2022

Resumen

Esta investigación se centra en la localización georreferenciada de los recursos distribuidos, concretamente en la inyección de potencia activa a través de la generación distribuida. Se tomó como caso de estudio un alimentador marginal rural-urbano de una empresa distribuidora de Ecuador con información georreferenciada, que cuenta con un enlace primario trifásico a media tensión y varios ramales monofásicos a media tensión de gran longitud, para abastecer a usuarios alejados de la red de la empresa local. En consecuencia, para analizar el comportamiento de la red eléctrica, se utilizó el software Cymdist para realizar simulaciones en estado estacionario con y sin la inserción de generación distribuida. Para la ubicación de la generación distribuida, se empleó el índice de predicción de colapso de voltaje como técnica para cuantificar e identificar problemas en los nodos de la red. Además, a partir de la metodología propuesta, se obtuvo la georreferenciación idónea de los sitios donde es necesario inyectar potencia activa para mejorar los perfiles de tensión y reducir el índice de predicción de colapso de voltaje.

Palabras clave: generación distribuida, índice de predicción de colapso de voltaje, recursos distribuidos, sistemas eléctricos de potencia

Abstract

This research focuses on the georeferenced location of distributed resources, specifically in the injection of active power through distributed generation. A rural-urban marginal feeder of a distribution company in Ecuador with georeferenced information was taken as a case study, which has a medium voltage three-phase primary link and several medium voltage one-phase branches of great length to supply users located far from the local company's network. Consequently, to analyze the behavior of the electrical network, the Cymdist software was used to perform simulations in steady state without and with the insertion of distributed generation. For the location of distributed generation, the voltage collapse prediction index was used as a technique to quantify and identify problems in the network nodes. Moreover, based on the proposed methodology, it was obtained the suitable georeferencing of the sites where it is necessary to inject active power to improve the voltage profiles and reduce the voltage collapse prediction index.

Keywords: Distributed generation, Voltage collapse prediction index, Distributed resources, Electric power systems

¹ Master program of bussines administrator, Indiana Tech University, Fort Wayne - Indiana - USA.

^{2,*}Electrical Engineering Department, Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: dcarrion@ups.edu.ec

³Electrical Engineering Department, Universidad Don Bosco, San Salvador - El Salvador.

⁴Electrical Engineering Department, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín - Colombia.

Forma sugerida de citación: Lemus, A.; Carrión, D.; Aguirre, E. y González, J. W. "Localización de recursos distribuidos en redes eléctricas rurales-urbanas marginales, considerando el índice de predicción de colapso de tensión," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 28, pp. 25-33, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.02>.

1. Introducción

En la actualidad, los sistemas eléctricos de potencia (SEP) buscan optimizar recursos renovables no convencionales y, por esto, muchos de ellos han comenzado a cambiar la matriz energética, apostando a solar fotovoltaica, solar térmica de baja y alta entalpía, eólica on-shore y off-shore y plantas geotérmicas de potencia. Estas plantas de generación han incorporado nuevas variables en los procesos de decisión y optimización de la operación y despacho de energía [1,2].

La ventaja de este tipo de solución es que es posible reducir las pérdidas en los sistemas de transmisión eléctrica y, por tanto, puede asegurarse que el sistema de potencia es eficiente. La presencia de generación distribuida (GD) plantea nuevos retos en la gestión y operación de redes eléctricas. A la fecha, esto representa cerca del 20 % de la generación total en algunos sistemas de potencia, y esta cifra está aumentando gradualmente en función de las políticas energéticas de cada región. Un ejemplo de este cambio puede verse en Europa, con un sistema de energía con menor dependencia en recursos no renovables, con la introducción de políticas de reducción de emisiones que impactan significativamente los mercados eléctricos [3–6].

Otra solución a este problema es la inserción de recursos distribuidos de energía (RDE), que también se han incrementado en el planeta, buscando así un sistema de energía sustentable con menores problemas ambientales y mayor eficiencia energética. Por lo tanto, se han generado conceptos de gestión de DER, y se han creado plantas virtuales de potencia (PVP). Una PVP es un actor individual en el mercado eléctrico que consta de varios RDE. Dentro de este nuevo concepto, los propietarios de PVP pueden acceder al mercado eléctrico mientras compensan el déficit de potencia debido a la intermitencia en las fuentes de energía eólica y solar, acompañado por la incertidumbre en el comportamiento de la demanda [7–9].

Con el aumento en la penetración de RDE en la red eléctrica, se requiere mayor flexibilidad del lado del consumidor. La flexibilidad en los RDE desplegados en una red de distribución puede convertirse en un atractivo activo para ser comercializado en mercados de electricidad. Una PVP puede proporcionar una respuesta a la demanda de un agregador operando en el mercado. Sin embargo, esta flexibilidad puede estar sujeta al comportamiento del usuario, y a regulaciones locales en el sector residencial [10].

En la actualidad, el principio de operación de las PVP está basado en la respuesta a la demanda (RD), la técnica más ampliamente utilizada e investigada. Por lo tanto, la gestión de carga comercial e industrial y la generación distribuida son el foco principal de estos estudios. Varios factores definen los modelos de negocio bajo los cuales operan las PVP, tales como el método de financiamiento (mercado o incentivos), mercado

objetivo (servicios del sistema, gestión de desequilibrio, el día siguiente, durante el día, mercado de balance), factor de motivación (estructura de precios, aspectos ambientales, aspectos del sistema), tipo de consumidor (residencial, comercial, industrial y alumbrado público), características de consumo (capacidad de respuesta, capacidad, confiabilidad, frecuencia, duración), características de la GD (recurso primario, capacidad de respuesta, capacidad, confiabilidad, frecuencia, duración), tipo de activación (tiempo de respuesta, duración, cambios, capacidad) y modo de control (manual, semiautomático o automático) [11,12].

En general, las PVP pueden responder a dos tipos de mercado: mercados marginales, donde todos los generadores reciben el mismo precio que corresponde al precio marginal de despacho más alto, y mercados pague-por-oferta, donde los PVP reciben un precio ofrecido por ellos. La administración de la operación de los SEP depende de los estudios de flujo de potencia (FP) con técnicas de optimización y simulación. Los flujos de potencia óptimos DC (FPO-DC) y AC (FPO-AC) son las técnicas más comúnmente empleadas para la optimización del flujo de potencia. Por otra parte, para la simulación se tienen softwares especializados tales como Digsilent Power Factory y Cymdist, lo cual permite la implementación de estudios georreferenciados de flujo de potencia, a partir de los cuales pueden obtenerse los diferentes parámetros eléctricos como voltaje de nodo, ángulo, flujos de potencia activa y reactiva, despacho de generación y factor de potencia [13,14].

La mayoría de los estudios se han enfocado en estudiar los RDE en redes de distribución urbanas, donde se concentra la carga, y los beneficios se obtienen al establecer un balance técnico-económico. Sin embargo, los estudios son escasos para redes de distribución urbanas marginales, por lo que esta investigación se enfoca en identificar el punto de conexión de un RDE según técnicas de simulación en un sistema de distribución rural georreferenciado [15–17].

A través de los resultados obtenidos de la simulación, se determina el índice de predicción de colapso de voltaje (IPCV) en cada nodo. Los nodos en los que el índice es cercano a 1 se convierten en nodos candidatos para ubicar un RDE, de manera que los puntos de conexión de los RDE se determinan posteriormente a través de la metodología heurística propuesta. Para este propósito, se verifican el perfil de voltaje, la reducción de pérdidas, y la mejora en el factor de potencia. La Figura 1 muestra la conceptualización de las ideas planteadas en esta investigación.

El artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 se refiere a los conceptos relacionados con recursos distribuidos, la sección 3 define el problema y los casos de estudio, la sección 4 analiza los resultados, y la sección 5 presenta las conclusiones principales.

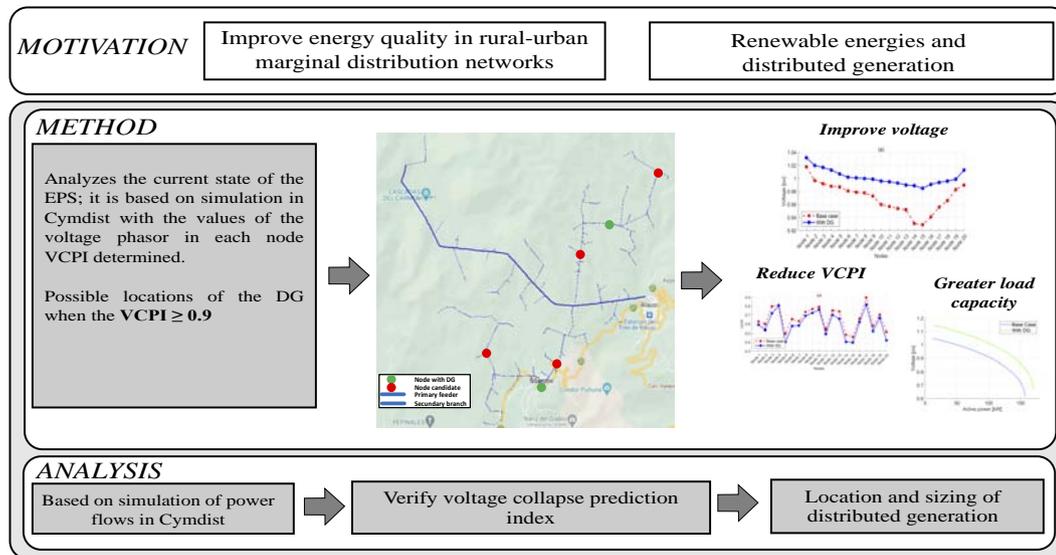


Figura 1. Conceptualización de la investigación

1.1. Trabajos relacionados

Una de las alternativas disponibles en SEP actuales para aliviar la congestión en las redes de distribución y transmisión son los recursos distribuidos de energía (RDE), un conjunto de tecnologías que pueden ser desplegadas en la red eléctrica. Entre estos está la generación distribuida, que busca generar electricidad muy cerca de los puntos de consumo. Otras tecnologías son los sistemas de almacenamiento de energía con baterías (SAEB), que buscan almacenar la energía que no se usa durante horas de baja demanda para que pueda ser utilizada durante horas pico, reduciendo así la necesidad de una generación centralizada.

1.1.1. Generación distribuida

La generación distribuida se ha convertido en una de las fuentes primarias de recursos naturales no convencionales para la generación de electricidad en sitios muy cercanos a la carga. Por lo tanto, la GD se conecta a las redes de distribución a niveles de voltaje medio o bajo, dependiendo del tipo de contrato y de su potencia. La fuente de energía primaria más importante para la generación de electricidad en GD es la solar, específicamente solar fotovoltaica, que puede ser puesta en funcionamiento desde plantas pequeñas ubicadas en las terrazas de residencias hasta complejos de generación que pueden alcanzar los MW de potencia instalada [18–20].

La GD ha hecho necesario que los sistemas de distribución se conviertan en redes bidireccionales, reduciendo así la congestión en las redes de transmisión y las pérdidas en los sistemas de potencia. Ahora los usuarios pueden ser parte del mercado de electricidad, produciendo su energía e inyectando el excedente en la red pública [21, 22]. La gestión energética de la GD

se lleva a cabo a través de las PVP que permiten un despacho óptimo de recursos sobre la base de sistemas de medición y monitoreo de la GD, los SAEB, y los recursos de carga controlable. La estrategia de control de PVP puede dividirse en tres patrones diferentes: control centralizado, control distribuido y control completamente distribuido; de acuerdo con su estructura e información, dependiendo de los roles y responsabilidades, las PVP pueden ser comerciales (CPVP), técnicas (TPVP) y combinadas [7], [23].

Las comunicaciones juegan un papel fundamental en la operación y gestión del VPP. Es posible tener una medición en línea en el tiempo de los recursos energéticos primarios que se utilizan para la generación de electricidad, la demanda necesaria en cada intervalo de tiempo, desbalances en las redes y necesidades energéticas descubiertas que deben ser importadas de las redes públicas para una adecuada gestión de la demanda [24, 25].

1.1.2. Índice de predicción de colapso de voltaje

En la operación de sistemas de potencia, muchos parámetros definen el comportamiento de los SEP, tales como índices de calidad de potencia, índices de estabilidad, índices de confiabilidad, perfil de voltaje, y carga-bilidad de la línea, entre otros. Los estudios de flujo de potencia permiten cuantificar cada uno de los parámetros eléctricos en la operación en estado estacionario del SEP, y son la herramienta matemática empleada por simuladores para mostrar el comportamiento de sistemas de potencia bajo diferentes escenarios de generación y demanda.

Existen diferentes índices de confiabilidad y estabilidad para verificar el estado de los sistemas de potencia. Por ejemplo, los SEP se analizan considerando el es-

tado de contingencia N-1 para estudiar la confiabilidad. Para este propósito, el índice de ranquin de confiabilidad se utiliza para determinar el grado de afectación de la contingencia, obteniendo así información que ayudará a planificar la expansión y mejora del SEP. Por otra parte, se han propuesto diferentes índices para identificar fallas de voltaje, ángulo, frecuencia, cargabilidad y fluctuaciones de carga [26–29].

La identificación de los límites operativos permite determinar nodos con deficiencias en los cuales el sistema de potencia debe ser mejorado; de manera que a través del IPCV, determinado mediante la ecuación (1), es posible localizar nodos problemáticos antes que el sistema de potencia pueda colapsar debido a cualquier cambio en la carga [30]. El IPCV se basa en los fasores de voltaje y las características de admitancia de la red eléctrica, y se calcula para cada nodo del SEP. Los valores de IPCV están entre 0 y 1; valores más cercanos a 1 indican una mayor probabilidad de colapso del voltaje en ese nodo.

$$VCPI_k = \left| 1 - \frac{\sum_{m \neq k}^n V'_m}{V_k} \right| \quad (1)$$

$$V'_m = \frac{Y_{km}}{\sum_{j \neq k}^n Y_{kj}} V_m \quad (2)$$

Donde:

V_m es el fasor de voltaje en el nodo m ,
 V_k es el fasor de voltaje en el nodo k ,
 Y_{km} es la admitancia entre los nodos k y m ,
 Y_{kj} es la admitancia entre los nodos k y j .

El IPCV es una técnica global que considera los efectos de las cargas en los otros nodos sobre un nodo particular, lo cual puede estar vinculado a los estudios de estabilidad de voltaje obtenidos analizando las curvas P-V; por lo tanto, puede decirse que el IPCV puede predecir un nodo en el sistema de potencia en el cual puede ocurrir inestabilidad de voltaje.

La Tabla 1 muestra contribuciones significativas en la planificación de sistemas eléctricos de distribución, los cuales en años recientes han estado enfocados en tópicos tales como energías renovables, recursos distribuidos, generación distribuida, plantas virtuales de potencia y gestión de demanda. Los principales parámetros eléctricos analizados por otros autores son voltaje, congestión, factor de potencia y georreferenciado.

Tabla 1. Resumen de trabajos relacionados

Autor	Año	Objetivos	Parámetros considerados				Temática		
			Voltaje	Congestión	Estabilidad	Georreferenciado	Generación distribuida	Planta virtual de potencia	Planificación
Sena [20]	2022	Evaluación de la red eléctrica	✓	✓	-	-	✓	-	✓
Heang [18]	2022	Reducir pérdidas de potencia activa	✓	✓	-	-	-	-	✓
Quiñeros [13]	2022	Recuperación de sistemas de potencia	✓	✓	✓	-	-	-	✓
Carrión [28]	2021	Mejorar sistemas eléctricos de potencia	✓	✓	✓	✓	-	-	✓
Aderibigbe [19]	2021	Ubicación óptima de generadores distribuidos	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
Mosquera [3]	2020	Ubicación óptima de plantas virtuales de potencia	✓	✓	-	-	✓	✓	✓
Valenzuela [23]	2019	Gestión de redes de distribución eléctrica	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Valenzuela [25]	2019	Planificación de redes de distribución subterráneas	-	✓	-	✓	-	-	✓
Danish [26]	2019	Índice de estabilidad de voltaje	✓	✓	-	✓	-	-	-
Inga [22]	2018	Planificación de la red de distribución eléctrica	✓	✓	-	✓	-	-	-
Actual		Planificación y dimensionamiento de la red de distribución eléctrica	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓

2. Materiales y métodos

2.1. Problema y metodología

El alimentador 1500090T01 de la compañía eléctrica Riobamba (EERSA S. A.) ha sido tomado como un caso de análisis, dado que el área de concesión de la compañía de distribución corresponde en su porcentaje más significativo a redes rurales y urbanas marginales. El alimentador 1500090T01 se muestra en la Figura 2, en la que puede verse que tiene dos enlaces al anillo de subtransmisión y dos derivaciones monofásicas para los usuarios; la cobertura de este alimentador es 100 % rural, donde sus usuarios están alejados unos de otros, y existen problemas de calidad de servicio. Dado que es una red marginal urbana-rural, solo el enlace primario es trifásico, y todas las ramas son monofásicas, lo cual genera un problema adicional acerca del balance de potencia, por lo que se asume que la ubicación de la GD propuesta estará adaptada a los perfiles de voltaje y a las diferentes fases existentes en el punto de conexión.

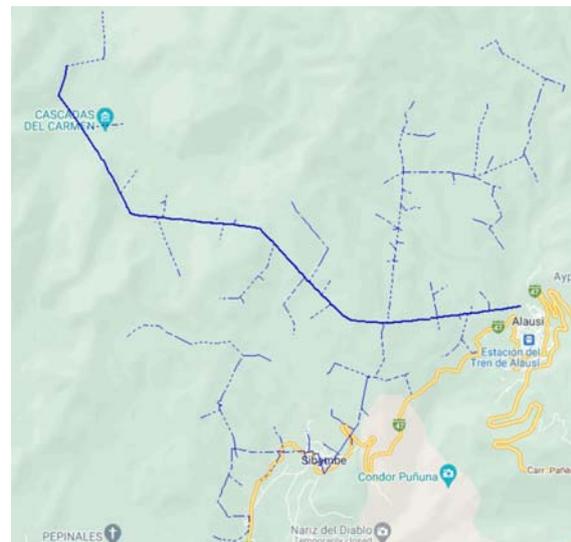


Figura 2. Alimentador 1500090T01 de EERSA S. A.

La Figura 3 muestra el diagrama unifilar equivalente del sistema de potencia considerado en el análisis, en el cual pueden distinguirse dos ramas secundarias. Los nodos de las ramas secundarias están identificados por la letra U para la rama superior, y por la letra D para la rama inferior. La rama superior consta de veinte nodos conectados a los usuarios finales y la rama inferior tiene veintiséis nodos.

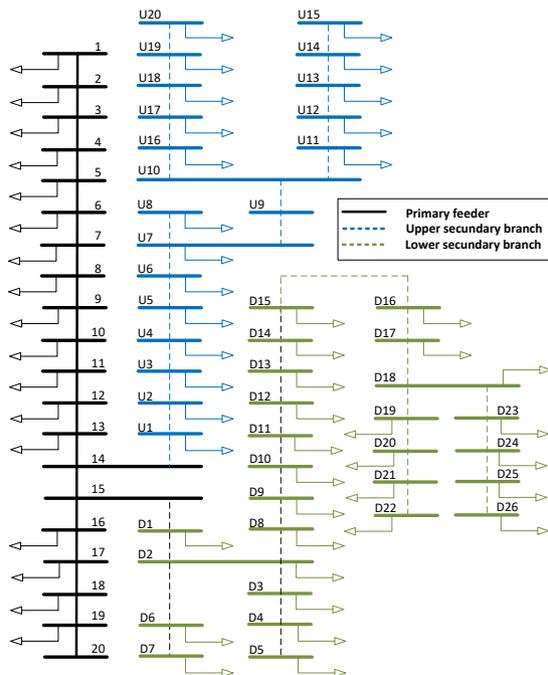


Figura 3. Diagrama unifilar equivalente del alimentador

El análisis de los flujos de potencia fue realizado a través de la simulación en Cymdist, con la cual se obtiene el estado actual de la red, data que constituye el punto de partida para la ubicación de los recursos distribuidos en la red; con estos valores se procede a determinar el IPCV. Dado que existen diferentes perfiles de voltaje, los estudios serán realizados en pu, valores cuya base está referida al enlace trifásico principal, de tal manera que se unifican las diferentes variables eléctricas. El algoritmo 1 define la metodología para la inserción de la DG en los nodos que presentan un IPCV muy cercano a 1, asumiendo la existencia del recurso primario, espacio físico y sin generar un impacto ambiental más significativo.

Tabla 2. Variables relacionadas con el modelo matemático

Símbolo	Descripción
V_i	Voltaje en el nodo i .
$P_{i,j}$	Flujo de potencia activa entre los nodos i y j .
$Q_{i,j}$	Flujo de potencia reactiva entre los nodos i y j .
Pd_i	Demanda de potencia activa en el nodo i .
Qd_i	Demanda de potencia reactiva en el nodo i .
n	Número de nodos en el SEP.
Pot_{DG_i}	Potencia activa de la DG.

Algoritmo 1 Ubicación de la GD en base al IPCV

Paso 1: Data de entrada

Parametrización del sistema eléctrico de potencia
 Generadores, líneas, transformadores, cargas, matriz de conectividad
 Simulación en estado estacionario con Cymdist
 Salvar $[V_i, P_{i,j}, Q_{i,j}, Pd_i, Qd_i]$.

Paso 2: Determinación de IPCV

```
for  $i = 1 : n$ 
     $IPCV_i = IPCV_k$ 
end for
```

Paso 3: Posibles nodos para GD

```
Ordenar VCPI
for  $i = 1 : n$ 
     $VCPI_i \geq 0.9$ 
    Seleccionar nodo  $can_d_i = i$ 
end for
```

Paso 4: Ubicación y dimensionamiento de GD

```
Ubicar DG n  $node_i$ 
 $Pot_{DG} = 1$ 
If  $VCPI \geq 0.9$ 
    Descartar nodo
else
    for  $i = 1 : length(can_d)$ 
        while  $VCPI_i \geq 0.9$ 
             $Pot_{DG_i} = Pot_{DG_i} + 1$ 
        end while
    end for
end if
```

Paso 5: Muestrar resultados

```
 $can_d_i, Pot_{DG_i}, P_{i,j}, Q_{i,j}, V_i$ 
```

La metodología para el despliegue ideal de la GD en sistemas de potencia se muestra en el algoritmo 1, en el cual se considera el IPCV como la restricción primaria; en el paso 1, se considera la simulación en estado estacionario del SEP en Cymdist, y se almacenan los diferentes parámetros eléctricos. En el paso 2, se analiza el estado estacionario del sistema de potencia, y se determina el IPCV en cada nodo. En el paso 3 se realiza la comparación de los IPCV, y los valores más altos de IPCV se toman como ubicaciones posibles de la GD. En el paso 4, se realiza la ubicación y el dimensionamiento de la GD. Finalmente, en el paso 5, se muestran los resultados de la metodología propuesta aplicada en la simulación en Cymdist. Para el dimensionamiento de la GD se consideraron pasos de 1 kW, comparando el IPCV previo con el nuevo, así como también los perfiles de voltaje y la congestión de la

línea. La Tabla 2 muestra la notación de las variables utilizadas en el algoritmo 1.

La metodología propuesta analiza el estado actual del SEP, está basada en la simulación en Cymdist, y con los valores del fasor de voltaje determina el IPCV en cada nodo. Este índice es el parámetro de decisión para las ubicaciones posibles de la GD cuando el $IPCV \geq 0,9$; cada nodo en el cual el IPCV se reduce ($IPCV \leq 0,9$) después de implementar la GD, es considerado un nodo en el cual la GD debe implementarse. De esta manera, una vez que se tienen las ubicaciones posibles, se coloca la GD en esos nodos, y si el IPCV no se reduce se descarta el nodo. Para dimensionar la GD, se realizaron pasos incrementales de 1 kW hasta obtener valores de $IPCV \leq 0,9$ en todos los nodos del SEP. Una vez que se determinan los nodos en los cuales debe implementarse la GD y su capacidad de potencia, se analiza el estado actual y se verifica si mejoró el perfil de voltaje y la estabilidad, analizando los cruces P-V.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de resultados

El índice identificó los posibles nodos donde puede colocarse la GD para mejorar el indicador anterior, sin afectar los otros parámetros eléctricos. Basándose en la simulación en el software Cymdist, se obtuvieron los flujos de potencia en estado estacionario del SEP, y con esto, aplicando el algoritmo 1 y según los fasores de voltaje, se determinó el IPCV en cada nodo. La ubicación de los posibles nodos y la ubicación final de la GD pueden observarse en la Figura 2.

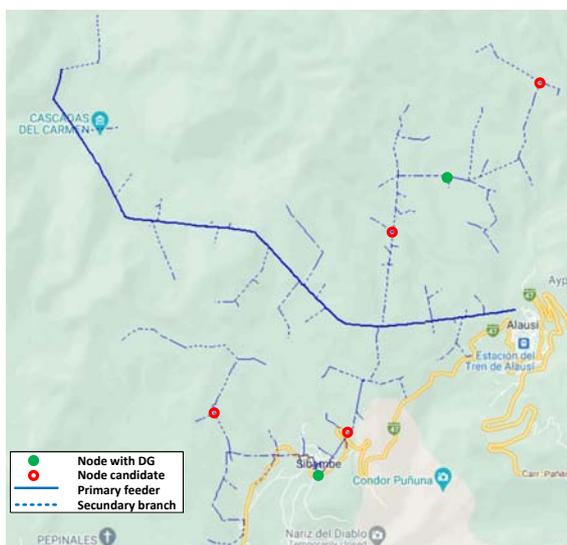


Figura 4. Ubicación georreferenciada de la GD

Como se muestra en la Figura 4, la GD no se ubica en la red trifásica, sino en dos de las ramas monofásicas,

por lo cual los sistemas de GD también deben ser monofásicos. El sistema de GD en la rama superior está dimensionado con un valor de 17 kW en el nodo U8, cuyas coordenadas son Lat.: -2.1669009 , Long.: -78.8633971 . El valor incluye el IPCV mejorado en todos los nodos de esa rama. Por otra parte, en la rama inferior, la potencia de la GD fue 32 kW en el nodo D12, cuyas coordenadas son Lat.: -2.2292529 , Long.: -78.8900419 , la cual, al igual que en la rama superior, mejora el IPCV de la rama completa.

El perfil de voltaje en el alimentador principal puede observarse en la Figura 5a, el de la rama superior se observa en la Figura 5b y el de la rama inferior en la Figura 5c; en los tres casos, puede verse como el voltaje mejora luego que la GD entra en el punto seleccionado por la metodología propuesta. Por otra parte, la Figura 6 muestra la comparación del IPCV antes y después de la inserción de la GD para el alimentador principal (Figura 6a), la rama superior (Figura 6b) y la rama inferior (Figura 6c).

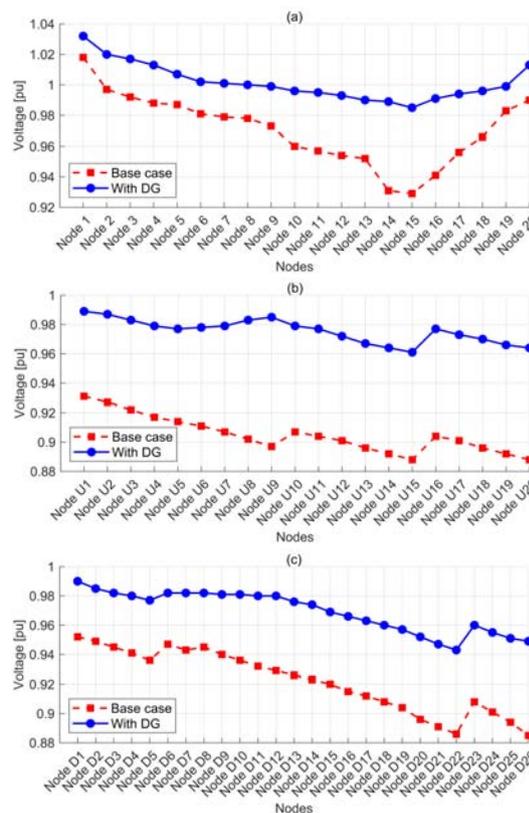


Figura 5. Perfil de voltaje en los nodos

El IPCV intenta reducir sus valores originales, por lo que puede afirmarse que la calidad del servicio eléctrico mejora en estas ramas, lo cual sin duda es uno de los parámetros eléctricos observados hoy en día por los planificadores de sistemas de potencia.

Considerando que se han hecho modificaciones al SEP en comparación con su estado inicial, es necesario

verificar la operación global de la red de distribución, y una manera de hacerlo es analizar la estabilidad del sistema. Para el caso base propuesto basado en el IPCV, es necesario estudiar la estabilidad del voltaje, lo cual se hace a través de las curvas P – V. En consecuencia, se han considerado los nodos del alimentador principal a donde se conectan las ramas secundarias, es decir, los nodos 14 y 15.

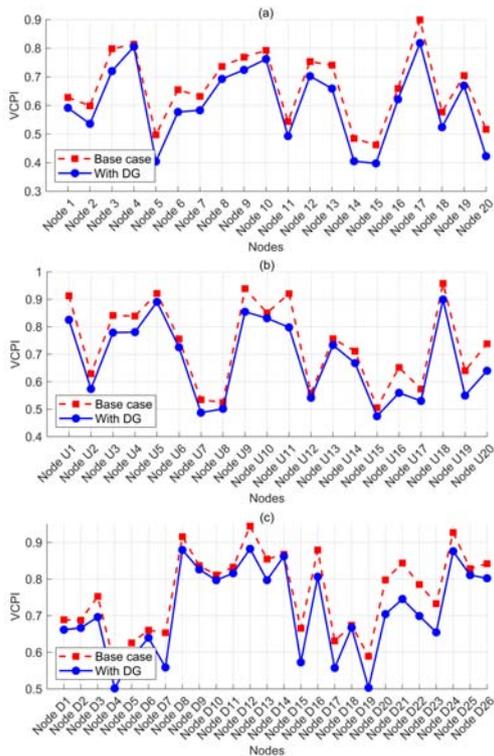
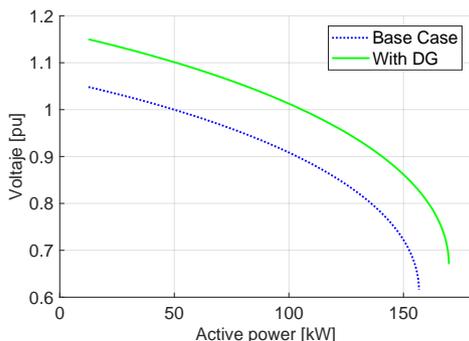
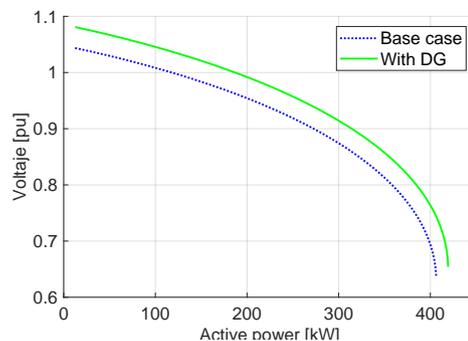


Figura 6. IPCV en los nodos

La Figura 7a muestra la curva P – V para el nodo 14. Puede observarse como el voltaje aumenta con la fluctuación de la carga total de la rama superior; asimismo, la bifurcación de Hopf se desplaza hacia la derecha. Una situación similar puede verse en la Figura 7b, que muestra los resultados en el nodo 15 que alimenta a la rama inferior.



(a) Curva P-V en el nodo 14



(b) P-V curve in node 15

Figura 7. Curvas P – V (a) Nodo 14. (b) Nodo 15

4. Conclusiones

Los diferentes estudios que pueden realizarse a través de técnicas de simulación son innumerables. Con frecuencia, son despreciados debido a la falta de interrelación o conocimiento para extraer sus parámetros y usarlos en programas de modelado tales como Matlab o Python. Para el caso de estudio presentado, se extrajeron las bases de datos de resultados. A través de Matlab, se implantó la metodología propuesta de acuerdo con los resultados, determinando así la ubicación ideal de los posibles puntos en los cuales puede inyectarse la potencia de la GD. La ubicación y el dimensionamiento de la GD mejoraron los perfiles de voltaje del SEP completo, contrario a lo que ocurre cuando se realiza compensación reactiva, que solo mejora el perfil de voltaje en la vecindad del punto de inyección reactiva.

Fue viable demostrar que a través del IPCV es posible detectar nodos con debilidades en el sistema de potencia, y esto puede ser usado para diferentes estudios; para el caso propuesto, a través del análisis de este parámetro fue posible ubicar y dimensionar dos puntos de inyección de potencia activa en una red de distribución.

Es posible analizar sistemas de potencia con data georreferenciada y no solo tener los ejemplos estipulados en la literatura, tales como los modelos CIGRE e IEEE. Ahora es posible acceder a las bases de datos de compañías de distribución y proveer soluciones reales a sus problemas. Es esencial resaltar eso a través de Cymdist.

El georreferenciado del punto de inyección de potencia activa es muy útil para contrastar con los recursos primarios existentes en el sitio, y determinar qué tipo de energía primaria puede ser empleada para superar los inconvenientes de la red eléctrica.

Referencias

- [1] P. del Río and P. Mir-Artigues, “Combinations of support instruments for re-

- newable electricity in Europe: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 287–295, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.039>
- [2] M. A. Salmani, A. Anzalchi, and S. Salmani, “Virtual Power Plant: New Solution for Managing Distributed Generations in Decentralized Power Systems,” in *2010 International Conference on Management and Service Science*, 2010, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2010.5577383>
- [3] F. Mosquera, “Localización óptima de plantas virtuales de generación en sistemas eléctricos de potencia basados en flujos óptimos de potencia,” *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33412/idt.v16.2.2827>
- [4] A. Riofrío and D. Carrión, “Approach and Deployment of Distributed Generation. State-of-art Based on Induction Cooker System,” in *ANDESCON 2014*, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2014.7098544>
- [5] S. Singh, A. R. Gautam, and D. Fulwani, “Constant power loads and their effects in DC distributed power systems: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, no. December 2015, pp. 407–421, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.027>
- [6] Z. Ren, W. Yan, C. Ding, J. Yu, and X. Zhao, “Probabilistic optimal power flow analysis of virtual power plant containing photovoltaic generation,” *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, vol. 2015-March, no. March, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066012>
- [7] H. Saboori, M. Mohammadi, and R. Taghe, “Virtual power plant (VPP), definition, concept, components and types,” *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2011.5749026>
- [8] P. Nezamabadi and G. Gharehpetian, “Electrical energy management of virtual power plants in distribution networks with renewable energy resources and energy storage systems,” *16th Electrical Power Distribution Networks Conference*, pp. 1–5, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ygQznn>
- [9] M. Peikherfeh, H. Seifi, and M. K. Sheikh-El-Eslami, “Optimal dispatch of distributed energy resources included in a virtual power plant for participating in a day-ahead market,” *3rd International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2011*, pp. 204–210, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2011.6036275>
- [10] L. Exel and G. Frey, “Toward a decentralized forecast system for distributed power generation,” *ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference*, pp. 1210–1217, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2014.6850577>
- [11] L. Hernández, C. Baladron, J. Aguiar, B. Carro, A. Sánchez-Esguevillas, J. Lloret, and J. Masana, “A Survey on Electric Power Demand Forecasting: Future Trends in Smart Grids, Microgrids and Smart Buildings,” *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, no. 99, pp. 1–36, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SURV.2014.032014.00094>
- [12] P. Asmus, “Microgrids, Virtual Power Plants and Our Distributed Energy Future,” *The Electricity Journal*, vol. 23, no. 10, pp. 72–82, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2010.11.001>
- [13] F. Quinteros, D. Carrión, and M. Jaramillo, “Optimal Power Systems Restoration Based on Energy Quality and Stability Criteria,” *Energies*, vol. 15, no. 6, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en15062062>
- [14] T. Kishore and S. Singal, “Optimal economic planning of power transmission lines: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 949–974, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.125>
- [15] V. C. Güngör, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergüt, C. Buccella, S. Member, C. Cecati, and G. P. Hancke, “Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2166794>
- [16] U. Akpan, M. Essien, and S. Isihak, “The impact of rural electrification on rural micro-enterprises in Niger delta, Nigeria,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 17, no. 5, pp. 504–509, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2013.06.004>
- [17] D. Carrión, E. García, J. González, I. Isaac, G. López, and R. Hincapié, “Método heurístico de ubicación óptima de centros de transformación y enrutamiento de redes eléctricas de distribución,” *Revista Técnica "Energía"*, vol. 4, no. 2,

- p. 20, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37116/REVISTAENERGIA.V13.N1.2017.11>
- [18] S. Heang and V. Vai, "Optimal Network Reconfiguration with DGs Placement and Sizing in a Distribution System Using Hybrid SOE and GA," in *2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, no. 1. IEEE, 2022, pp. 2–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON54298.2022.9795530>
- [19] M. A. Aderibigbe, A. U. Adoghe, F. Agbetuyi, and A. E. Airoboman, "A review on optimal placement of distributed generators for reliability improvement on distribution network," *2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica, PowerAfrica 2021*, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543266>
- [20] S. K. Sena, "An Approach to Detect Islanding in Photovoltaic Based Distributed Generation Systems using Sequence Components of Voltage," in *2022 IEEE International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE)*. IEEE, 2022, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICDCECE53908.2022.9792918>
- [21] W. Pavón, E. Inga, and S. Simani, "Optimal routing an ungrounded electrical distribution system based on heuristic method with micro grids integration," *Sustainability*, vol. 11, no. 6, pp. 1–18, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su11061607>
- [22] E. Inga, M. Campaña, and R. Hincapié, "Optimal Sizing of Electrical Distribution Networks considering Scalable Demand and Voltage," *2018 IEEE 1st Colombian Conference on Applications in Computational Intelligence, ColCACI 2018 - Proceedings*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ColCACI.2018.8484859>
- [23] A. Valenzuela, I. Montalvo, and E. Inga, "A decision-making tool for electric distribution network planning based on heuristics and georeferenced data," *Energies*, vol. 12, no. 21, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en12214065>
- [24] F. Heimgaertner and M. Menth, "Distributed Controller Communication in Virtual Power Plants Using Smart Meter Gateways," *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2018 - Proceedings*, pp. 1–6, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436311>
- [25] A. Valenzuela, E. Inga, and S. Simani, "Planning of a Resilient Underground Distribution Network Using Georeferenced Data," *Energies*, vol. 12, no. 4, p. 644, 2019. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1996-1073/12/4/644>
- [26] M. S. Shah Danish, T. Senjyu, S. M. Shah Danish, N. R. Sabory, K. Narayanan, and P. Mandal, "A recap of voltage stability indices in the past three decades," *Energies*, vol. 12, no. 8, pp. 1–18, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en12081544>
- [27] R. Mahanty and P. Gupta, "Voltage stability analysis in unbalanced power systems by optimal power flow," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 151, no. 3, pp. 201–212, 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20050011>
- [28] D. Carrión, E. García, M. Jaramillo, and J. W. González, "A Novel Methodology for Optimal SVC Location Considering N-1 Contingencies and Reactive Power Flows Reconfiguration," *Energies*, vol. 14, no. 20, pp. 1–17, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14206652>
- [29] D. Carrión, J. Palacios, M. Espinel, and J. W. González, "Transmission Expansion Planning Considering Grid Topology Changes and N-1 Contingencies Criteria," in *Recent Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Springer, Ed. Springer, pp. 266–279. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72208-1_20
- [30] I. A. Samuel, J. Katende, C. O. Awosope, and A. A. Awelewa, "Prediction of voltage collapse in electrical power system networks using a new voltage stability index," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 12, no. 2, pp. 190–199, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/39Orhn8>



CONTROL PASIVO TOLERANTE A FALLOS DE SENSADO EN DISPOSITIVOS DE COMPENSACIÓN DINÁMICOS – SVC MEDIANTE UNA ESTRATEGIA HÍBRIDA

PASSIVE CONTROL TOLERANT TO SENSING FAULTS IN DYNAMIC COMPENSATION DEVICES – SVC THROUGH A HYBRID STRATEGY

Jessica Ramírez ^{1,*} , Leony Ortiz ¹ , Alexander Águila ¹ 

Recibido: 15-05-2022, Recibido tras revisión: 13-06-2022, Aceptado: 17-06-2022, Publicado: 01-07-2022

Resumen

En esta investigación se desarrolla un sistema de control tolerante a fallas pasivas, para un compensador reactivo estático acoplado a una microrred en modo conectado, orientado a aquellas fallas que resultan de daños comunes en sus sistemas de sensado. El método planteado utiliza un controlador óptimo robusto H_∞ y redes neuronales artificiales como método de estimación no lineal. La simulación, validación, identificación de la planta y el diseño del controlador se llevan a cabo por medio de un sistema benchmark de una microrred, programado en Matlab/Simulink. La investigación muestra valiosos resultados como el mejoramiento en la confiabilidad y resiliencia de los compensadores estáticos ante fallas de sensado, mejoras en el comportamiento de la señal de salida del controlador del compensador estático expuesto a las fallas de sensado y disminución del error con respecto al controlador clásico.

Palabras clave: control robusto, DSTATCOM, FTC, H_∞ , microrred, NARX

Abstract

In this research, a passive fault tolerant control system is developed for a static reactive compensator coupled to a microgrid in connected mode, oriented to those faults that result from common damages in their sensing systems. The proposed method uses an H_∞ robust optimal controller and artificial neural networks as a nonlinear estimation method. The simulation, validation, plant identification and controller design are carried out using a microgrid Benchmark system, programmed in Matlab/Simulink. The research shows valuable results such as: the improvement in the reliability and resilience of static compensators against sensing failures, improvements in the behavior of the output signal of the static compensator controller exposed to sensing failures and the error decrease with respect to the classic controller.

Keywords: DSTATCOM, FTC, H_∞ , microgrids, NARX, Robust control

^{1,*}Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: jramirezg4@est.ups.edu.ec

Forma sugerida de citación: Ramírez, J.; Ortiz, L. y Águila, A. "Control pasivo tolerante a fallos de sensado en dispositivos de compensación dinámicos – SVC mediante una estrategia híbrida," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 28, pp. 34-43, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.03>.

1. Introducción

Las necesidades mundiales de energía continúan incrementándose, debido al aumento de las industrias y a las relacionadas con el transporte. De esta manera, tales requerimientos han llevado al surgimiento de nuevas formas de generación de electricidad a través de recursos de energías renovables y el uso de redes más pequeñas que las tradicionales, conocidas como microrredes (MR) [1–3]. Una MR puede entenderse como un sistema eléctrico en pequeña escala, que contiene varios generadores, cargas y sistemas de almacenamiento de energía distribuidos [1, 4–6].

Esto se debe al surgimiento de nuevos tipos de cargas, tales como vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento que funcionan con corriente directa, que se conectan junto con cargas de corriente alterna, que son más recurrentes en redes domésticas [4]. Las MR mixtas o híbridas AC/DC han tomado especial relevancia para los investigadores, debido a la viabilidad ofrecida por cada tipo de MR, con la única necesidad de incluir dispositivos de conversión de energía que funcionan con elementos de electrónica de potencia [7–13].

Debido a sus características, las MR deben ser capaces de funcionar tanto en modo conectado a una red como en modo independiente, y por cada modo debe existir una correcta operación y control, que incluso debe ser capaz de tolerar ciertos problemas y fallas [1, 4, 13, 14].

El control de las operaciones también debe considerar elementos característicos de cierto tipo de generación como eólica y solar, donde la variabilidad e intermitencia son comunes; y estos son aspectos que deben considerarse para una operación continua, estable, segura y resiliente de la MR híbrida. Existen diferencias y cambios significativos a una red eléctrica tradicional, en comparación a las funcionalidades ofrecidas por las MR, especialmente aquellas que operan en AC y DC. En aspectos relacionados con el control y los problemas que podrían ocurrir en la operación, tales cambios están directamente relacionados con la existencia de operaciones de control distribuidas y la existencia de flujos de potencia bidireccionales [15, 16].

Como se indicó previamente, uno de los aspectos más relevantes para el funcionamiento apropiado de las MR es la presencia de control robusto, que debe ser capaz de tolerar la existencia de fallas en varios componentes del sistema de control y de la MR. Durante eventos de falla y de mal funcionamiento de sensores y actuadores de los diferentes subsistemas de la MR, el sistema de control con retroalimentación tradicional puede no ser capaz de garantizar la estabilidad del sistema o el desempeño de todos sus componentes.

Por lo tanto, existen nuevas estrategias para la gestión de este tipo de redes, entre las que pueden mencionarse control tolerante a fallas (*Fault Tolerant Controls*, FTC por sus siglas en inglés) [1, 13, 14, 17].

Tales estrategias permiten el surgimiento de sistemas de control tolerantes a fallas (*Fault-tolerant Control Systems*, FTCS por sus siglas en inglés), que pueden superar las deficiencias antes mencionadas [18].

El control tolerante a fallas puede dividirse en dos grupos: control activo (AFTCS), que son aquellos que contienen estrategias de diagnóstico y detección de fallas en tiempo real, a través del uso de información. Los sistemas de control activo también tienen mecanismos de reconfiguración que permiten a la MR mantenerse estable y con un desempeño aceptable, aun cuando existan fallas en varios componentes del sistema [1, 18, 19].

Por otra parte, los controles tolerantes a fallas pasivos son diseñados para tener una estructura robusta única, esto es, no hay manera de que sean reconfigurados automáticamente durante eventos de falla. Otra diferencia es que ellos no consideran la información que un sistema de detección y diagnóstico de fallas (*Fault Detection and Diagnosis System*, FDD, por sus siglas en inglés) puede tener [1, 18].

Los sistemas de control tolerantes a fallas han sido ampliamente estudiados, y existen varias propuestas que operan en modo conectado a una red y también cuando la MR opera en modo independiente. La operación en modo conectado a la red convencional se apoya en los parámetros de la red principal, y la mayoría de las propuestas previamente establecidas están relacionadas con el uso de bancos de capacitores y sistemas de transmisión AC flexibles (*Flexible AC Transmission Systems*, FACTS, por sus siglas en inglés). En el caso de estrategias de control avanzadas, también se utilizan regulaciones de voltaje en las zonas de generación, a pesar de que los controladores pueden estar directamente en el elemento a ser controlado, como se muestra en la Figura 1 [1], [20].

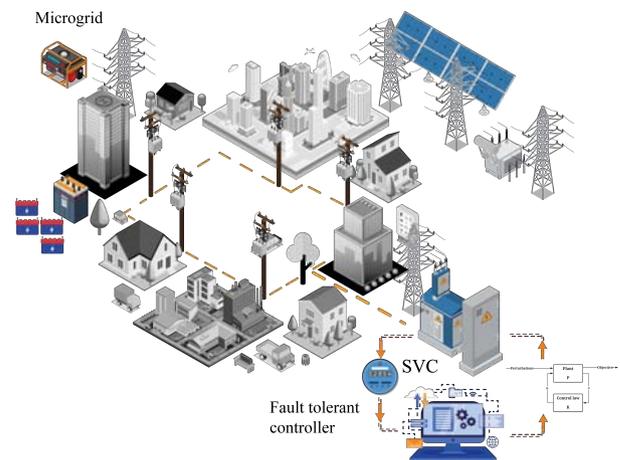


Figura 1. Control tolerante a fallas

Por otra parte, en operación aislada, los investigadores han determinado que existen otras necesidades, tal como la selección correcta del sistema generador,

que viene a ser el líder de frecuencia [20]. Principalmente, cuando existe una alta penetración de fuentes de generación con energías renovables, con sus inherentes características de intermitencia y discontinuidad, se complica el empleo de estrategias de control tradicionales para MR [20].

En [20] se presenta un sistema FTC que permite la tolerancia a fallas mediante un controlador adaptativo basado en modelo, a través de un control PID entonado por un algoritmo genético y una estructura con inteligencia; se afirma que esta estructura garantiza el monitoreo de las condiciones de la MR, lo cual permite la regulación de la frecuencia y la amplitud del voltaje. Se considera la existencia de escenarios de falla, incluyendo fallas en los actuadores, conexión repentina de carga, así como también fallas de corta duración, lo cual permite probar el desempeño del método propuesto.

En [21] se presenta una estrategia FTC para hacer frente a la pérdida de efectividad y fallas inmovilizantes que ocurren en un SVC; la estrategia utilizada en ese documento emplea una técnica adaptativa de retroceso con un control de superficie dinámica (*Dynamic Surface Control*, DSC por sus siglas en inglés). Los resultados de la investigación muestran que la estrategia puede producir un buen desempeño sobre señales en el sistema a lazo cerrado, bajo la ocurrencia de las fallas descritas.

Otras investigaciones centran su atención en controladores tolerantes a fallas para sistemas de control en un área amplia, pero no se centran en un SVC. El controlador encuentra generalmente la manera de hacer frente a fallas sobre la comunicación de señales para controlar el sistema completo. Otras investigaciones utilizan sistemas de compensación estáticos o dinámicos para controlar el ángulo de máquinas síncronas, donde el control robusto trata de mantener la máquina en buenas condiciones operacionales [22].

2. Materiales y métodos

2.1. Microrredes

En general, las MR son un conjunto revolucionario de elementos que trabajan conjuntamente para generar, transportar y suministrar potencia a un conjunto de cargas en una cierta área geográfica, que pueden operar en forma aislada o con un enlace de interconexión con una red convencional. Esto implica que una MR debe tener elementos de generación y cargas, que buscan un balance constante en función de los recursos disponibles a nivel tecnológico y ambiental. En general, las MR hacen uso de sistemas de generación que aprovechan recursos renovables como agua, viento, calor o radiación solar [23, 24].

Los sistemas de generación y los puntos de consumo están vinculados por sistemas de distribución

que pueden ser AC o DC, como se muestra en la Figura 1, con la correspondiente necesidad de tener elementos de conversión AC/DC o DC/AC. Por otra parte, y debido a las necesidades de cubrir deficiencias que pueden surgir de las implicaciones de un sistema completo, pero con recursos limitados, puede disponerse de sistemas de compensación reactiva e incluso sistemas de almacenamiento, que a largo plazo pueden mejorar la calidad de servicio [25–27].

2.2. Red neuronal

Puede concebirse un modelo abstracto bastante sencillo del funcionamiento de una neurona artificial, el cual puede observarse en la Figura 2.

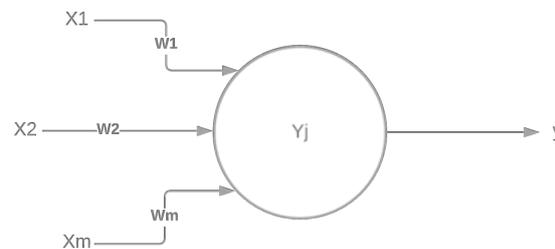


Figura 2. Neurona artificial

La neurona artificial está constituida por un conjunto de pesos representados por los valores W_1 , W_2 , W_m , que representan las conexiones sinápticas de una neurona real, un vector x que contiene las entradas y , finalmente, una salida de la unidad representada por y , que es el resultado de una función de activación.

Una red neuronal artificial es la composición computacional de múltiples procesadores elementales que forman un sistema adaptativo que, a través de un algoritmo, es capaz de ajustar sus pesos con el fin de mejorar el desempeño con el empleo de muestras. Una de las principales ventajas de las redes neuronales artificiales es la facilidad de usar data de entrenamiento a través de procesos supervisados y no supervisados. El proceso supervisado ocurre haciendo uso de data conocida de entrada y salida, esperando que la data de salida de la red neuronal sea lo más similar posible a la data de salida disponible. El aprendizaje no supervisado utiliza un conjunto de patrones que son válidos para encontrar estructuras o configuraciones que están presentes en la data [28].

2.3. Compensación Estática de VAR (*Static Var Compensation, SVC*)

Dentro de los dispositivos tipo FACT, el compensador reactivo estático está en la categoría de los que tienen una conexión baipás. El dispositivo en cuestión recibe el nombre de TCR y consiste de un inductor controlado por medio de dispositivos de electrónica de potencia

conocidos como tiristores [29]. A través del control correcto del disparo del TCR se obtiene una variación de la reactancia que, a largo plazo, implica un cambio en el consumo de potencia reactiva en el punto de conexión del compensador; entonces es posible mejorar el factor de potencia en dicho punto. El voltaje de la barra también se revisa en este punto [29–32].

El dispositivo es controlado modificando el ángulo de disparo de los elementos de potencia que constituyen el SVC. Esta lógica de control se implementa por lazos de control que pueden contener controladores PI o PID, o incluso opciones más robustas como la que será implementada en esta investigación [33–37]. Los dispositivos de compensación reactiva se utilizan en las MR con el fin de compensar factores de potencia que están fuera de parámetros normales [29–37].

Debido a los efectos de las cargas conectadas al sistema, una alteración del factor de potencia resulta en una afectación del voltaje en las barras del sistema [29–37]. Por otra parte, es usual que los sistemas de generación en la MR requieran consumo o que debido a sus propios principios de generación causen modificaciones en los valores reactivos, los cuales pueden producir una caída del voltaje de salida de las unidades y, por tanto, una caída en la potencia. Este problema puede ser resuelto con la instalación de un SVC [29–37].

2.4. H-infinito (H_∞)

Se emplea para obtener controladores con desempeño garantizado y que son estables; el uso de estos modelos se presenta como un problema de optimización a través del cual se encuentra un modelo que satisfaga el objetivo. Una de las principales ventajas de este método es que es ampliamente aplicable en sistemas multivariables, mientras que parte de sus desventajas incluyen un alto nivel de conocimiento matemático y un entendimiento del sistema a ser controlado.

El nombre del método se basa en el hecho que la optimización se lleva a cabo en el llamado espacio Hardy, en la mitad positiva del plano complejo, y representa el máximo valor del espacio mencionado, entendido como la máxima ganancia en cualquier dirección y en cualquier frecuencia para un sistema SISO. Es la máxima magnitud de la respuesta en frecuencia. Dentro de sus usos está la reducción del impacto de una perturbación en un sistema a lazo cerrado, que puede verse como estabilidad o desempeño.

La planta tiene entradas exógenas que incluyen una señal de referencia, perturbaciones y señales manipuladas. Por otra parte, existen salidas entre las cuales hay una señal de error que debe ser minimizada y las variables medidas que serán utilizadas como señales de control en el sistema. Las variables manipuladas pueden calcularse por medio de las señales medidas y el valor de K . La expresión (1) sirve para formular el problema en forma matricial [17, 38, 39].

$$\begin{bmatrix} z \\ v \end{bmatrix} = P(s) \times \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

Es posible calcular la dependencia de z en w por medio de la transformación fraccional lineal inferior (*Lower Linear Fractional Transformation*, LFT, por sus siglas en inglés) que se muestra en la ecuación (2), donde $F_l \times (P, K)$ representa el resultado de la LFT que puede ser empleada para encontrar la relación entre z and w .

$$\begin{aligned} z &= F_l \times (P, K) \times w \\ F_l \times (P, K) &= P_{11} + P_{12} \times K \times \\ &\quad (I - P_{22} \times K)^{-1} \times P_{21} \end{aligned} \quad (2)$$

De acuerdo con lo anterior, se sabe que el objetivo del método en cuestión requiere encontrar un controlador K tal que se minimice $F_l \times (P, K)$ según la norma H_∞ , siendo la misma aplicable al diseño llevado a cabo por medio de H_2 . Existen algunas técnicas para alcanzar el objetivo, entre las cuales está la parametrización de Youla-Kucera que conduce a controladores de muy alto orden, métodos basados en la solución de dos ecuaciones de Riccati que requieren muchas simplificaciones. Finalmente, el método basado en optimización con una reformulación de Riccati utilizando inecuaciones lineales matriciales, un método que requiere pocas suposiciones [17].

2.5. Diseño del controlador tolerante a fallas

La señal de control es manipulada directamente por el controlador, que reemplaza un controlador PI tradicional que fue parte del sistema de control, y cuyo desempeño se compara con el del controlador H_∞ .

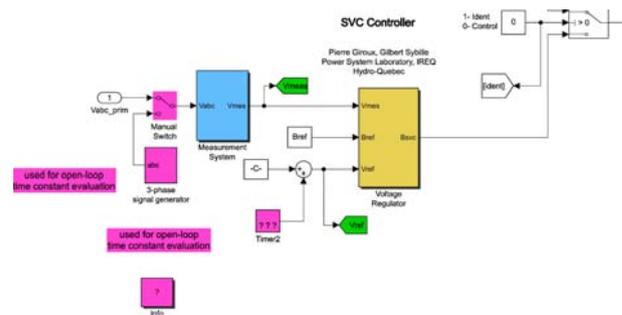


Figura 3. Área del controlador

La Figura 3 ilustra el área del controlador en la cual se inserta el controlador robusto. Puede verse que las variables que se miden son las que corresponden a las señales de voltaje, además de tener los valores correspondientes a las referencias necesarias para generar señales de control adecuadas.

Por otra parte, la Figura 4 muestra la manera en la cual el controlador diseñado es ubicado dentro del regulador de voltaje, considerando la necesidad de reducir el error a 0. El error corresponde a aquellos valores que resultan de la diferencia entre el voltaje medido y el voltaje de referencia, además de restar el valor correspondiente a la señal de control, que en este caso está representada por B_{svc} . Se entiende que el controlador actúa directamente sobre la señal de control.

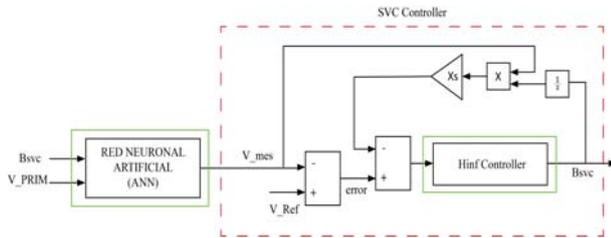


Figura 4. Diseño del regulador de voltaje

2.6. Formulación del problema

Se dice que un controlador es tolerante a fallas cuando este controlador es capaz de mantener los objetivos de control, a pesar de estar sujeto a la ocurrencia de fallas; las fallas en cuestión pueden ser aditivas o no aditivas, dependiendo de la alteración que ellas causen. A largo plazo, estas alteraciones en las mediciones crean modificaciones en las ecuaciones del espacio de estados, mientras que las fallas no aditivas o multiplicativas causan cambios en los términos del espacio de estados.

La tolerancia a fallas puede alcanzarse mediante estrategias pasivas o activas, y en algunos casos son capaces de mantener el controlador con cambios en sus parámetros, mientras que en otros casos las leyes de control pueden ser reconfiguradas [1, 13].

3. Resultados y discusión

3.1. Caso de estudio

Para el presente estudio, se propone el uso de un sistema de prueba tipo benchmark, que corresponde a una MR de catorce barras compuesta de dos sistemas de almacenamiento de energía, dos plantas de generación fotovoltaica, un generador diésel y un punto de interconexión con una red convencional. Además de cargas lineales y no-lineales, y, finalmente, un SVC. El modelo mencionado puede verse en la Figura 5 [3].

El controlador es sujeto a simulaciones para obtener un modelo detallado de la planta a través de uso del espacio de estados; el proceso de simulación genera una planta del controlador SVC. El método propuesto se prueba con la ocurrencia de fallas de sensado no maliciosas de tipo incipiente o abrupto en el primario del sistema de control, y el controlador tolerante a fallas diseñado mediante la metodología H_∞ se implementa dentro del SVC.

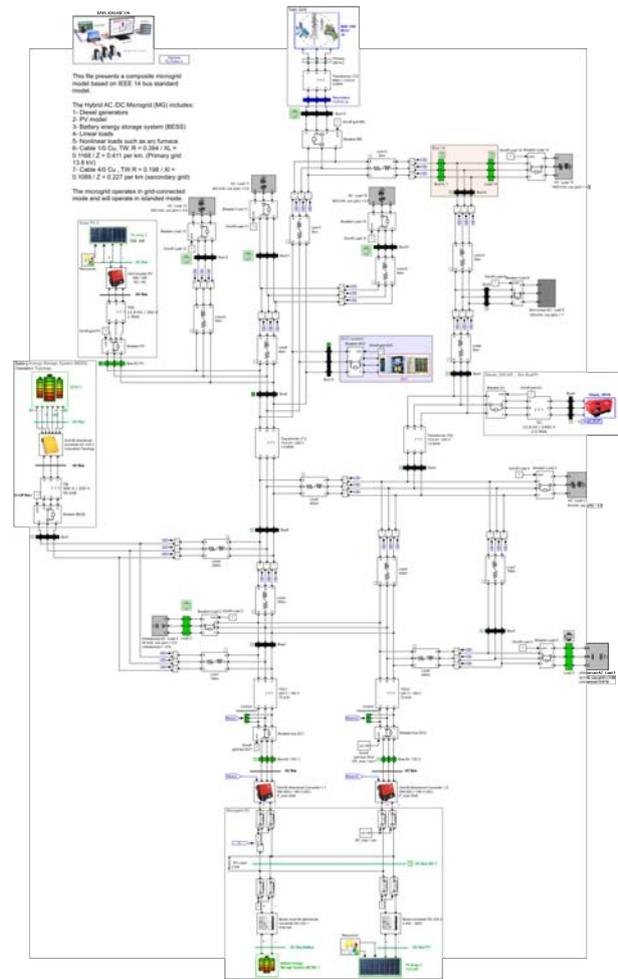


Figura 5. Diagrama de la microrred

3.2. Resultados

El controlador que se obtiene a través del proceso de diseño propuesto genera los parámetros para el controlador de acuerdo con lo que se muestra en la ecuación (3), donde A , B , C y D representan los arreglos que forman el espacio de estados que describe la región del controlador de voltaje del SVC.

$$A = \begin{bmatrix} -2,85e^{-3} & -437,52 & -200,38 \\ -189,32 & -108,03 & -119,03 \\ -31,96 & 10,56 & -21,65 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -2,25e^{+3} \\ -9,54e^{+3} \\ -2,56e^{+3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = [-2,68e^{-17} \quad -6,32e^{-17} \quad 3,62e^{-19}]$$

$$D = 0$$

Por otra parte, la red neuronal instalada está diseñada para trabajar con dos entradas, cada capa tiene un total de diez neuronas en su capa oculta, mientras que cada una tiene tres neuronas de salida. Existen dos sistemas disponibles del tipo NARX y cada uno

es usado independientemente para trabajar con las señales primarias y secundarias. Sobre la base de lo que se estableció anteriormente, se desarrollaron simulaciones correspondientes a las fallas. Se planifica que la falla ocurra a un tiempo de simulación de 0,4 segundos, una vez que la MR ha encontrado estabilidad en su punto de operación. Las fallas ocurren según lo explicado por diferentes factores que disparan alteraciones en las señales adquiridas del primario; las fallas probadas son incipientes, Figuras 6 y 9, y otra de tipo abrupta que se muestra en la Figura 7.

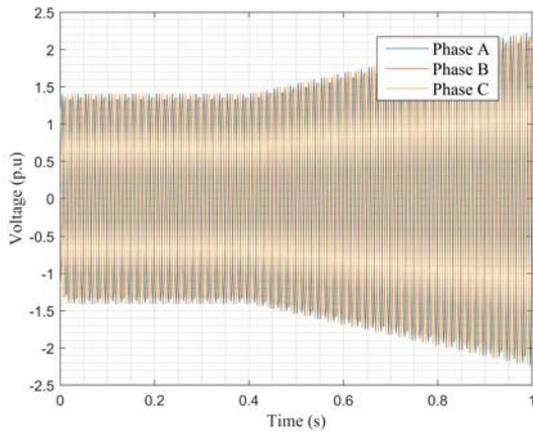


Figura 6. Falla incipiente en el primario

Puede verse que la falla abrupta que ocurre a los 0,4 segundos de simulación causa una salida con valor de 0, lo que sugiere una desconexión del sensor de voltaje involucrado.

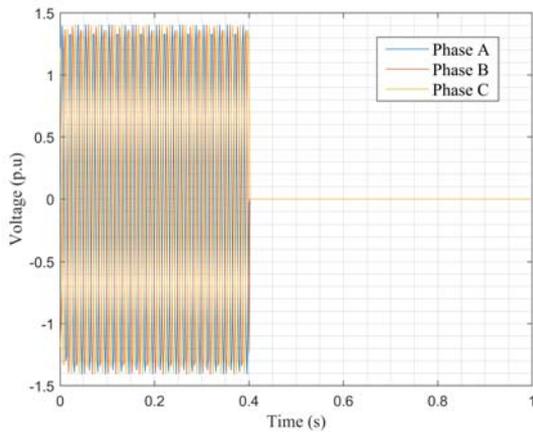


Figura 7. Falla abrupta en el primario

Las señales mostradas fueron probadas con el fin de verificar cómo una falla de sensado puede causar cambios indeseados en las señales de control de los dispositivos vinculados a tales señales. En este caso específico, la señal de control dispara la potencia de los dispositivos de detección involucrados en la operación de SVC.

3.3. Falla incipiente

La Figura 8 muestra una comparación del desempeño de ambos métodos de control y cómo ellos se desarrollan antes de la ocurrencia de la falla incipiente.

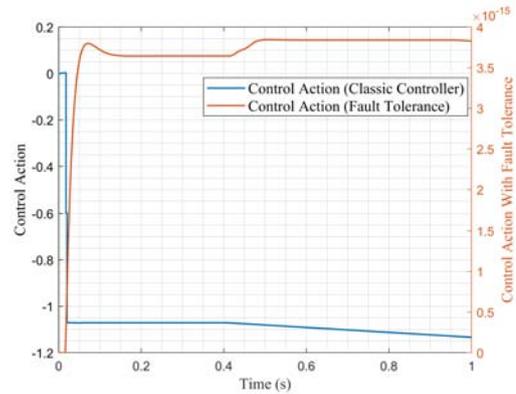


Figura 8. Acción de control: falla incipiente

Puede verse que la acción de control resultante de ambos métodos es completamente diferente en forma y magnitud. La acción de control resultante del controlador PI tiene una magnitud que varía entre 0 y $-1,2$ aproximadamente, mientras que la acción de control resultante del controlador H_{∞} diseñado varía entre 0 y 4×10^{-15} . Estas magnitudes son alteradas por los puntos de referencia a los cuales el sistema está sujeto antes de los 0,4 segundos de ocurrencia de la falla, y una vez que ocurre la falla, la acción de control es inmediatamente modificada.

La Figura 9 se presenta para un mejor entendimiento del comportamiento; dicha figura ilustra el valor de error que ocurre con cada acción de control, el cual debe ser minimizado. Se observa que cuando ocurre una falla, el comportamiento de la acción de control del controlador PI tiende a una divergencia constantemente creciente, mientras que en el caso del error tiende a cambiar, pero el cambio es mínimo en comparación con la acción de control más tradicional.

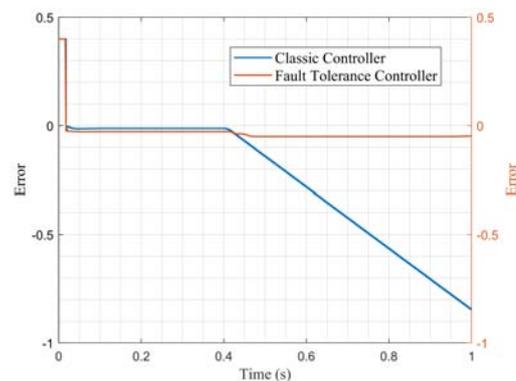


Figura 9. Error: falla incipiente

La Figura 10 muestra el comportamiento del voltaje de salida (pu) en la fase A, luego que la señal es procesada por el controlador H_∞ y una etapa constituida por una red neuronal artificial. Una vez que ocurre la falla, el voltaje tiende a tener una fluctuación como un efecto esperado, sin que esta modificación sea significativa, ya que tiene una variación de 0,02 unidades con respecto a la condición prefalla.

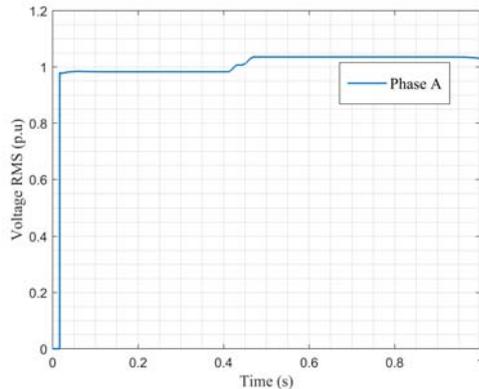


Figura 10. Voltaje RMS (pu), fase A: falla incipiente

3.4. Falla abrupta

De manera similar a lo que fue reseñado con la falla incipiente, se presentan los resultados obtenidos para el caso de falla es abrupta; la Figura 11 muestra el comportamiento de la acción de control para la falla abrupta.

Puede visualizarse nuevamente que la acción de control con un controlador tradicional tiene una variación entre $-1,2$ y $3,5$ unidades, teniendo un cambio repentino a los 0,4 segundos, en la ocurrencia de la falla. Por otro lado, la acción de control con el uso del sistema H_∞ se mantiene en el intervalo entre 0 y 4×10^{-15} , con un comportamiento similar al obtenido en la falla estudiada previamente; incluso, el controlador muestra una menor fluctuación después de 0,4 segundos de la falla incipiente.

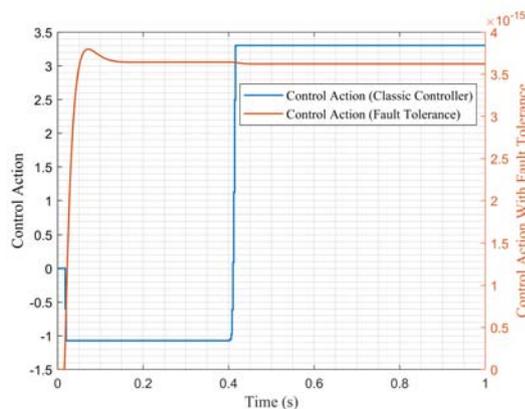


Figura 11. Acción de control: falla abrupta

También se presenta la Figura 12, correspondiente al error producido como un efecto de la acción de control con ambos controladores. Una vez más, es evidente que el error causado por el controlador H_∞ es mucho menor que el producido por el controlador PI luego de la ocurrencia de la falla. El controlador PI causa nuevamente una divergencia en el error, a pesar de que en este caso el error se estabiliza en un corto período de tiempo.

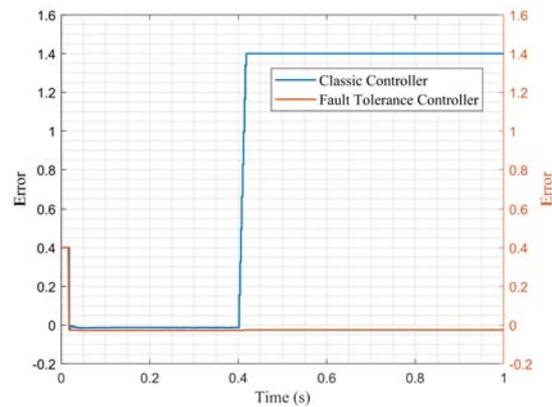


Figura 12. Error: falla abrupta

Como se reseñó previamente, se grafica el voltaje RMS en la fase A como un efecto de la implementación del controlador robusto; el resultado se muestra en la Figura 13.

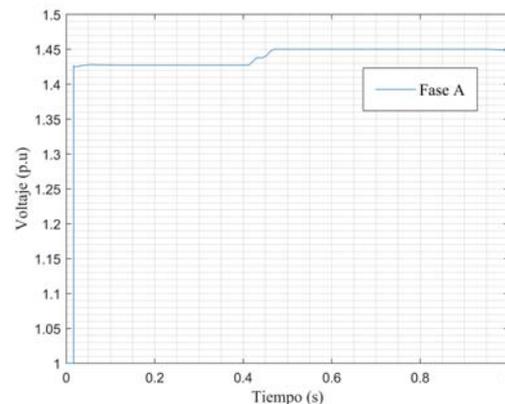


Figura 13. Voltaje RMS (pu), fase A: falla abrupta

Dado que el error es producido por la acción de control es pequeño, la variación que ocurre en el voltaje también es pequeña, lo cual valida la robustez del controlador ante la ocurrencia de fallas de sensado.

4. Conclusiones

Se verifica que la implementación de un controlador tolerante a fallas diseñado por medio de H_∞ , mejora la capacidad de los controladores de soportar alteraciones

producidas por eventos de falla en la entrada del controlador. El desempeño es mucho mejor que el de un controlador PI convencional. La nueva estrategia de control es efectiva para mantener la estabilidad sin cambios significativos.

Se prueba exitosamente la operación del controlador diseñado por medio de simulación con el software Simulink/Matlab, especializado en simulación de sistemas dinámicos. El software permitió llevar a cabo simulaciones con el fin de realizar la identificación del sistema, además del diseño del controlador y su validación en una microrred implementada por medio de un sistema benchmark.

Los parámetros del controlador diseñado fueron calculados exitosamente. El sistema de control pasivo tolerante a fallas de sensado diseñado muestra mejor desempeño ante una falla abrupta que ante una incipiente, a pesar de que en ambos casos es significativamente mejor que un controlador tradicional.

El desempeño correcto de una red neuronal artificial se alcanza como un paso previo a la introducción de una señal medida en el controlador involucrado; la señal producida por un error de sensado es procesada por una red neuronal artificial y esta señal se introduce posteriormente en el controlador.

Se propone introducir la metodología de este artículo académico para el desarrollo de controladores robustos que puedan tolerar fallas maliciosas y la ocurrencia de otros tipos de fallas, así como también en diferentes tipos de dispositivos que requieren una acción de control robusta. Por otra parte, se propone realizar una investigación comparativa con algoritmos de selección que permitan escoger la mejor acción de control como resultado de diferentes metodologías, para mejorar su desempeño.

Referencias

- [1] L. Ortiz, J. W. González, L. B. Gutiérrez, and O. Llanes-Santiago, “A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids,” *Heliyon*, vol. 6, no. 8, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04799>
- [2] Á. J. Pérez Pazmiño and L. Ortiz Matos, “Despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas usando método heurístico,” *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 15, no. 1, pp. 80–96, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Oj9FP0>
- [3] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Águila, J. W. González, I. Isaac, and J. G. López, “Hybrid AC / DC microgrid test system simulation: grid-connected mode,” *Heliyon*, vol. 5, no. August, p. 21, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02862>
- [4] F. Chishti and B. Singh, “Hybrid control of renewable based microgrid synchronized to 3P4W AC distribution network,” in *2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (IC-NTE)*, 2021, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICNTE51185.2021.9487755>
- [5] M. Zolfaghari, G. B. Gharehpetian, M. Shafiekhah, and J. P. Catalão, “Comprehensive review on the strategies for controlling the interconnection of AC and DC microgrids,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 136, no. October 2021, p. 107742, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107742>
- [6] M. Ortiz and E. M. García Torres, “Pronóstico de la demanda eléctrica residencial basado en el modelo de regresión adaptativa multivariante spline (MARS),” p. 32, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3yewXQw>
- [7] H. Yu, S. Niu, Z. Shao, and L. Jian, “A scalable and reconfigurable hybrid AC/DC microgrid clustering architecture with decentralized control for coordinated operation,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 135, p. 107476, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107476>
- [8] K. Beleño, J. Berrío, A. Pardo, and O. Gualdrón, “Diseño de una smart grid para un sistema híbrido de energía,” *Prospectiva*, vol. 11, no. 2, pp. 94–101, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15665/rp.v11i2.44>
- [9] E. Baneshi, S. M. H. Kalali, and A. B. Dehkordi, “Microgrid optimal planning in two functional modes grid connected and the intentional islanding,” in *2019 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI)*, 2019, pp. 857–863. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/KBEI.2019.8735048>
- [10] D. Carrión and L. Ortiz, “Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos,” *Ingenius*, no. 10, pp. 44–48, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n10.2013.05>
- [11] L. O. Matos, L. B. Gutiérrez, J. W. Sánchez, and A. A. Téllez, “An ARX-Petri nets algorithm for active identification of an AC/DC microgrid simulation,” in *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 2019, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCAC.2019.8921191>

- [12] J. R. Collaguazo Solís and L. Ortiz Matos, “Control de voltaje óptimo para sistemas de almacenamiento de energía de batería (BESS) acoplados a microrredes de AC utilizando algoritmos LQG.” [Online]. Available: <https://bit.ly/3OBT48Z>
- [13] S. X. Garrido Jácome and L. Ortiz Matos, “Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de micro-redes eléctricas en DC,” 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bo7D1r>
- [14] S. P. Quishpe Guamantica and L. Ortiz Matos, “Detección de fallas de sensado en convertidores CA/CC para micro-redes híbridas usando análisis de componentes principales (PCA),” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3QKPKdJ>
- [15] M. Hosseinzadeh and F. R. Salmasi, “Fault-Tolerant Supervisory Controller for a Hybrid AC/DC Micro-Grid,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 2809–2823, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2620803>
- [16] G. X. Álvarez Yanchapanta and H. I. Vaca Vallejo, “Diseño de una microrred híbrida a base de energía fotovoltaica y energía térmica diésel para reducir la contaminación ambiental,” *Universidad de las Fuerzas Armadas. ESPE*, pp. 1–5, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xN2Eiw>
- [17] A. F. Falcón Ayala and L. Ortiz Matos, “Confiabilidad en microrredes eléctricas AC/DC usando control robusto H_∞ y estrategias de tolerancia a fallas,” 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bqDOO5>
- [18] S. Jadidi, H. Badihi, and Y. Zhang, “Passive fault-tolerant control of PWM converter in a hybrid AC/DC microgrid,” in *2019 IEEE 2nd International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*, 2019, pp. 90–94. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/REPE48501.2019.9025123>
- [19] B. N. Alhasnawi, B. H. Jasim, and B. E. Sedhom, “Distributed secondary consensus fault tolerant control method for voltage and frequency restoration and power sharing control in multi-agent microgrid,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 133, no. August 2020, p. 107251, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107251>
- [20] A. Vargas-Martínez, L. I. Minchala Ávila, Y. Zhang, L. E. Garza-Castañón, and E. R. Calle Ortiz, “Model-based fault-tolerant control to guarantee the performance of a hybrid wind-diesel power system in a microgrid configuration,” *Procedia Computer Science*, vol. 19, no. Seit, pp. 712–719, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.094>
- [21] Y. Xu, S. Tong, and Y. Li, “Adaptive fuzzy fault-tolerant control of static VAR compensator based on dynamic surface control technique,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 73, no. 3, pp. 2013–2023, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11071-013-0919-3>
- [22] F. Rafael and S. Sevilla, “Fault-tolerant Wide-area Control of Power Systems,” Ph.D. dissertation, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3tXSNW6>
- [23] A. Alexander, L. Ortiz, R. Orizondo, and G. López, “Optimal location and dimensioning of capacitors in microgrids using a multi-criteria decision algorithm,” *Heliyon*, vol. 7, no. 9, p. e08061, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08061>
- [24] L. Ortiz-Matos, A. Águila-Téllez, R. Hincapié-Reyes, and J. González-Sánchez, “Multi-criteria optimization of the deployment of a grid for rural electrification based on a heuristic method,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 73, p. 012020, jul 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/73/1/012020>
- [25] K. Wang, Y. Ma, P. Ding, R. Mu, and R. Sun, “Operation control strategy for photovoltaic/battery micro-grid,” in *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2018, pp. 821–824. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CICED.2018.8592593>
- [26] U. Akram, M. Khalid, and S. Shafiq, “Optimizing a grid-connected micro-grid with optimal renewable generation and battery energy storage,” in *2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE)*, 2017, pp. 1–9. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IEEEGCC.2017.8448232>
- [27] Y.-G. Lv, C.-Y. Long, and T.-Q. Cai, “Research on coordinated operating control of micro-grid power system including wind power, photovoltaic system and battery storage,” in *2014 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, vol. 1, 2014, pp. 181–187. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2014.7009114>
- [28] K. Gurney, *An Introduction to Neural Networks*. CRC Press, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9781315273570>

- [29] S. Bharti, S. Dewangan, and S. Ram, “Performance of wind farm distribution system under balanced and unbalanced condition with SVC & STATCOM,” in *2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, 2016, pp. 182–187. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICEPES.2016.7915927>
- [30] J. Aho and J. Turunen, “Power quality support for industrial load using hybrid svc,” in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1049>
- [31] X. Yang, W. Wang, and W. Jin, “The influence and control measures of distributed photovoltaic generation on the voltage in distribution system,” in *2012 China International Conference on Electricity Distribution*, 2012, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CICED.2012.6508538>
- [32] D. Jácome and A. Águila, “Localización y dimensionamiento óptimo de dispositivos SVC para la compensación de potencia reactiva en SEP,” pp. 1–17, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bhLlyx>
- [33] H. Ebrahimirad, A. Choobdar, and G. Dehnavi, “A new control approach for voltage quality improvement in distribution power system by means of an SVC,” in *2008 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 2008, pp. 583–586. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/cp:20080588>
- [34] Y. Y. Ojeda-Rebolledo, L. D. Pabón-Fernández, E. Caicedo-Peñaranda, J. L. Díaz-Rodríguez, and A. Pardo-García, “Compensador estático VAR para sistemas de distribución,” *Mundo Fesc*, vol. 11, no. 21, pp. 70–86, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/39LZFiv>
- [35] K. Tsunedomi, Y. Imazu, S. Tamura, T. Sodeyama, T. Omori, D. Cheung, M. Parr, and S. Gough, “Effectiveness of D-SVC on rural networks,” in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1020>
- [36] N. Demirovic, “Impact of STATCOM and SVC to voltage control in systems with wind farms using induction generators (IG),” in *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016)*, 2016, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1069>
- [37] R. Gitibin and F. Hoseinzadeh, “Comparison of D-SVC and D-STATCOM for performance enhancement of the distribution networks connected WECS including voltage dependent load models,” in *2015 20th Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC)*, 2015, pp. 90–100. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EPDC.2015.7330479>
- [38] W. Tian, Y. Wang, W. Deng, and L. Li, “H-infinity control for a class of multiple time delay fuzzy descriptor systems,” in *2013 6th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS)*, 2013, pp. 115–118. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICINIS.2013.36>
- [39] D. N. Abara and A. Lanzon, “H-infinity-PID controller for an open-loop unstable system,” in *2017 IEEE 3rd International Conference on Electro-Technology for National Development (NIGERCON)*, 2017, pp. 134–138. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/NIGERCON.2017.8281886>



DISEÑO IoT Y VALIDACIÓN DE SISTEMA DE MEDIDA PARA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

DESIGN AND VALIDATION OF IoT MEASUREMENT SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC GENERATION

Thiago Angelino dos Santos^{1,*} , Filipe Gomes de Freitas¹ ,
 Diego Lima Carvalho Gonçalves¹ , Luis Miguel Fernández-Ramírez² 

Recibido: 14-05-2022, Recibido tras revisión: 13-06-2022, Aceptado: 18-06-2022, Publicado: 01-07-2022

Resumen

El uso de sistemas fotovoltaicos (FV) para la generación de electricidad está en constante crecimiento en Brasil. Con la reducción del precio de los módulos FV y la implementación del sistema de compensación de energía eléctrica por parte del distribuidor de energía, el consumidor está invirtiendo en microgeneración FV para reducir la factura de energía. El objetivo del presente artículo es desarrollar un sistema embebido en el contexto de Internet de las cosas (IoT). Tener un sistema de monitoreo IoT aplicado a un sistema FV conectado a la red en una institución educativa ayuda a enseñar conceptos tanto de IoT como de generación FV. El sistema se basa en la placa de desarrollo ESP32 para la adquisición de tensión y corriente continua generada por un sistema FV de 1,35 kWp conectado a la red e instalado en el IFCE. Esta propuesta ofrece una solución educativa de bajo costo, con código abierto y hardware programable, que envían los datos a una base de datos en la nube, lo que permite el acceso remoto desde cualquier parte del mundo. Posteriormente, con una metodología de análisis de datos fue posible validar los valores medidos con el inversor instalado con un error inferior al 1 % para la tensión y la corriente adquiridas durante un día. Con este resultado se concluye que el sistema IoT diseñado puede ser utilizado para la medición en sistemas FV.

Palabras clave: ESP32, IoT, medida, fotovoltaica, energía, generación

Abstract

The use of photovoltaic (PV) systems for electricity generation is constantly growing in Brazil. With the reduction in the price of PV modules and the implementation of the electric power compensation system by the power distributor, the consumer is investing in PV microgeneration to reduce the electricity bill. This article aims to develop an embedded system in the context of the Internet of Things (IoT). Having an IoT monitoring system applied to a grid-connected PV system in an educational institution helps teach concepts such as IoT and PV generation. The system is based on the ESP32 development board for acquiring DC voltage and current generated by a 1.35 kWp PV system connected to the grid and installed at the IFCE. This proposal offers a low-cost educational solution using open source and programmable hardware, which sends the data to a database in the cloud, enabling remote access worldwide. Then, using the data analysis methodology, it was possible to validate the values measured with the inverter installed with an error below 1% for the voltage and current acquired during one day. With this result, it is concluded that the designed IoT system can be used for measurement in PV systems.

Keywords: ESP32, IoT, measurement, photovoltaic, energy, generation

^{1,*} Academic Master's Degree in Renewable Energy (PPGER). Federal Institute of Ceará (IFCE). Maracanaú Campus, Ceará, Brazil. Autor para correspondencia ✉: thiagoangelinos@gmail.com

² Research Group in Electrical Technologies for Sustainable and Renewable Energy. Department of Electrical Engineering, University of Cadiz (UCA). Escuela Politécnica Superior de Algeciras, Cádiz, Spain

Forma sugerida de citación: Dos Santos, T. A.; De Freitas, F. G.; Carvalho Gonçalves, D. L. y Fernández-Ramírez, L. M. "Diseño IoT y validación de sistema de medida para generación fotovoltaica," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 28, pp. 44-52, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.04>.

1. Introducción

La primera celda solar moderna, que tiene un área de dos centímetros cuadrados, fue introducida en 1954 con una eficiencia de 6 % y una potencia de 5 mW, tal como se describe en [1]. Se observó un avance significativo en el desarrollo del mercado de PV, identificado en [2], a partir de incremento en la producción china. Por octavo año consecutivo, Asia eclipsó a todas las otras regiones en nuevas instalaciones, con cerca del 58 % de las adiciones globales; aun excluyendo a China, Asia fue responsable de alrededor de 23 % de la nueva capacidad instalada en 2020. Asia fue seguido por América (18 %), que se ubicó por delante de Europa (16 %). China continuó dominando el mercado global (y de fabricación de FV solares), con una participación cercana al 35 % (elevándose desde 27 % en 2019). En 2021, la capacidad global estimada fue 760 gigawatts, como se muestra en [3].

Además de reducir el costo de los módulos FV, la generación distribuida en Brasil se ha convertido en una inversión atractiva en energía solar. Actualmente, el consumidor puede generar electricidad y usar el sistema de compensación para reducir el costo de energía consumida directamente en la factura. La compensación permite que la energía que excede el consumo para ese mes pueda utilizarse dentro de un período máximo de cinco años. Las condiciones para conectarse a la estructura convencional de distribución de electricidad fueron establecidas el 12 de abril de 2012, por la Agencia Nacional de Energía Eléctrica [4].

Saber cuánto generará el sistema FV por mes es una de las primeras preocupaciones del consumidor final. El ingeniero diseña el sistema, pero factores externos tales como el polvo, las fallas en el sistema, el desgaste de material y las condiciones del clima pueden alterar la generación de energía estimada en el diseño original. Con un sistema de monitoreo aplicado al de generación FV, es posible monitorear la producción y el consumo de electricidad. De esta manera, se identifican comportamientos atípicos para ese sistema: Cuanto más rápida sea esta identificación, menor será el daño al consumidor final.

Con respecto al monitoreo de datos vía Internet, el número de dispositivos conectados a la nube está aumentando y, en consecuencia, el volumen de datos ha crecido sustancialmente. Nuestras vidas diarias están rodeadas de información que es actualizada constantemente. Cuando se cambia un estado en una red social, se produce un flujo de información que genera actualizaciones a la base de datos del usuario. Esta forma dinámica de obtener información rápidamente, de manera accesible y actualizada no aplica solamente a las redes sociales o al periodismo. Considerada la cuarta revolución industrial, la Industria 4.0 ha venido ganando prominencia y promete tener un impacto más profundo y exponencial que las revoluciones indus-

triales previas. De acuerdo con Vitalli [5], uno de los pilares de la Industria 4.0 es el Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*, por sus siglas en inglés). Entre los dispositivos disponibles en el mercado para aplicaciones IoT están el ESP32 y el ESP-WROOM (modelo usado en este trabajo), que son utilizados constantemente en investigación académica debido a su fácil programación.

Los sistemas IoT son aplicados para facilitar la comunicación entre los equipos y los seres humanos en varias áreas, tales como hospitales [6], procesos de manufactura [7], gestión de desechos [8], así como también energías renovables [9], [10].

La plataforma de desarrollo ESP32 ha sido utilizada en proyectos IoT alrededor del mundo. Este dispositivo se usó para constituir un sistema de comunicación híbrido y un sistema de transmisión de datos en redes IoT [11]. Además de la comunicación wifi, el ESP32 también ofrece comunicación Bluetooth. Un sistema de control de ventanillas de vehículos fue desarrollado en [12] con comunicación Bluetooth.

Asimismo, el ESP32 fue empleado en una red de monitoreo de temperatura, humedad y calidad del aire en un centro de datos, para automatizar la activación y desactivación del sistema de enfriamiento, ventilación y filtrado del aire [13].

1.1. Trabajos relacionados

El ESP32 y el ESP8266 fueron considerados en [14] para construir una red IoT para medir datos de clima y la temperatura de módulos FV. La comunicación usada entre el ESP32 y el ESP8266 fue wifi.

En [15] se presenta un análisis comparativo y una aplicación práctica del módulo microcontrolador ESP32 para IoT. El artículo demostró que el ESP32 es una excelente opción para sistemas IoT, ya que presenta ventajas en desempeño y precio en comparación con los otros analizados. Su desempeño refleja su confiabilidad, asegurando que el sistema siempre esté operativo y corriendo. Por lo tanto, ellos pueden ser usados en sistemas críticos tales como el propuesto en [16] para monitorear fugas de gas licuado de petróleo (*liquefied petroleum gas*, LPG, por sus siglas en inglés).

En sistemas FV, el ESP32 fue utilizado en un sistema de control de bombeo de agua alimentado por un generador solar [17]. En [18] se desarrolló un servidor web con un ESP32 para monitorear y recolectar data de un sistema FV. La data fue almacenada en un archivo de texto y grabada directamente en la tarjeta de memoria SD. Los datos pueden ser recuperados, y el archivo de texto descargado a una página web.

Fue posible verificar el comportamiento real de los módulos FV a través de componentes de bajo costo, como puede verse en las curvas del sistema de seguimiento IV (corriente-voltaje) y PV (potencia-voltaje) construidas en [19]. También es posible moni-

torear el sistema FV con equipos de bajo costo [20], [21]. Este trabajo propuso el desarrollo y validación de un sistema IoT didáctico con hardware programable y de código abierto, apuntando a una mayor flexibilidad en la recolección y envío de datos a una base de datos. La validación fue hecha desde un inversor comercial con tecnología IoT. Así como el software sirvió para apoyar la enseñanza [22]. El sistema diseñado en esta investigación puede ser empleado en el salón de clase para enseñar sobre sistemas embebidos, internet de las cosas o energías renovables, como ejemplo de un sistema de monitoreo didáctico.

La Tabla 1 reúne algunos artículos que usan sistemas de monitoreo, aplicados o no a generación FV. Se observó el empleo de conexiones a internet a través de diferentes dispositivos para comunicación, procesamiento y envío de datos. La mayoría de los artículos presentados (67 %) no utilizaron un sistema de validación para los datos recolectados, especialmente en sistemas para medir variables eléctricas (voltaje y corriente, por ejemplo), como en el caso de este trabajo, mostrando la contribución de este artículo en esta área.

Tabla 1. Comparación de artículos de monitoreo similares

Artículo	Dispositivo	Método de validación
[23]	SamD21G	No aplicable
[24]	Arduino Mega 2560 + ESP8266	No aplicable
[25]	ESP32	Por equipo comercial
[26]	34970A	No aplicable
[20]	Raspberry Pi	No aplicable
[21]	SanUSB + Wi-Fi modem	Sensor de temperatura VA6510

Alves *et al.* [27] analizaron una situación a través de la ingeniería de entrenamiento didáctico (*Didactic Training Engineering*, DTE, por sus siglas en inglés), y encontraron que esta estructura facilita la mediación y el aprendizaje didáctico. El sistema propuesto puede ser usado para DTE en energías renovables, programación o sistemas embebidos. Otra aplicación para este proyecto es didáctica profesional (*Professional Didactics*, PD, por sus siglas en inglés). Alves [28] resaltó el uso de tecnología para proveer un entendimiento de las nociones discutidas en clase. De forma similar, los profesores podían iterar con los estudiantes utilizando el sistema propuesto en este trabajo.

Esta investigación apunta a diseñar, desarrollar y validar un sistema IoT didáctico para monitorear el voltaje y la corriente generados por los módulos FV. El objetivo de esta investigación es desarrollar un sistema didáctico fácil de reproducir, para diseminar el conocimiento en esta área de investigación, facilitando la adquisición de datos en plantas de generación solar fotovoltaica. Se aplican sensores de bajo costo para medir la corriente y el voltaje del sistema FV. Los datos obtenidos fueron comparados con los datos recolectados por el inversor FV instalado, verificando el error entre los sistemas para validar el sistema desarrollado.

Por ejemplo, el sistema desarrollado en esta investigación puede ser aplicado para verificar la potencia real generada por plantas FV en [29].

2. Materiales y métodos

2.1. Problema y metodología

Esta sección presenta las etapas de desarrollo del proyecto, presentando los materiales y métodos empleados. El sistema propuesto puede dividirse en cinco partes:

1. Sistema embebido con conexión wifi
2. Almacenamiento de datos en la nube
3. Detección
4. Data suministrada por el inversor
5. Programación del sistema embebido

2.1.1. Sistema embebido con conexión wifi

Varios dispositivos de bajo costo pueden proveer conexión a internet y realizar acciones preprogramadas. Con estos dispositivos es posible transformar un sistema de adquisición de datos local en un sistema IoT que alimente constantemente una base de datos en la nube.

La familia de dispositivos Raspberry Pi, desarrollada en el Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi, tiene el hardware integrado en una sola tarjeta y ranura de tarjeta de memoria, interfaz USB, HDMI, pines de entrada/salida, interfaz serial y módem wifi [30]. Estos dispositivos pueden integrarse fácilmente en una red IoT. En [31] se utilizó un Raspberry para monitorear corriente y voltaje en una planta FV de bombeo.

Algunos dispositivos de la plataforma Arduino [32], tales como ARDUINO UNO wifi REV2, están especialmente diseñados para aplicaciones IoT. Estos dispositivos tienen una plataforma de programación (Arduino IDE) amigable con el usuario en C++ con modificaciones menores.

Otros dispositivos ampliamente considerados, por su bajo costo, son los microcontroladores fabricados por Espressif [33]. Estos controladores, como el ESP32, permiten a los microcontroladores conectarse a una red inalámbrica. El fabricante suministra algunas versiones de hardware para ser usadas como se requiera.

La Tabla 2 muestra una comparación entre el ESP32 y una versión previa de los módulos IoT ESP8266 de Espressif (2014).

Tabla 2. Comparación entre ESP32 y ESP8266

ITEM	ESP32	ESP8266
<i>Clock</i>	160 MHz	80 MHz
<i>Wi-Fi</i>	Si	Si
<i>Bluetooth</i>	Si	No
RAM	512 KB	160 KB
<i>FLASH</i>	16 Mb	16 Mb
ADC	18	1
DAC	2	0
ADC – Analógico/Digital		
DAC – Convertidor Digital/Analógico		

Note que el ESP32 tiene mayor poder de procesamiento y almacenamiento en comparación al ESP8266. Por tanto, en esta investigación se utilizó el ESP32 para el sistema de monitoreo propuesto con conexión a internet.

2.1.2. Almacenamiento de datos en la nube

Algunas soluciones disponibles en el mercado son AWS IoT Services (Amazon Web Services), CloudMOTT y Ubidots. AWS IoT es un servicio especializado en tecnología IoT, del borde a la nube, ofrecidos por la compañía Amazon [34].

CloudMQTT apunta a facilitar el envío de mensajes, a través del protocolo MQTT, entre dispositivos en un sistema IoT. El soporte 24/7 ofrece conexión gratis para cinco usuarios a una velocidad de 10 Kbit/s [35].

Ubidots es una plataforma que permite conectar hardware y/o servicios digitales de datos a la nube, con su API de fácil integración. Tiene una plataforma editable para las necesidades del proyecto y una aplicación móvil gratuita. La licencia educativa otorga el derecho de conectar hasta veinte dispositivos con hasta diez sensores cada uno [36].

Sin embargo, este trabajo propone la creación de un sistema similar al utilizado en [7], pero sin el uso de almacenamiento local en una tarjeta SD. Toda la data es enviada a un servidor en la nube para ser comparada con la suministrada por el inversor instalado en el sistema FV.

ThingSpeak™ [37] es un servicio gratuito y configurable de plataforma de analítica empleada frecuentemente para el prototipaje de sistemas IoT, que permite acumular, visualizar y analizar flujos de datos en tiempo real con almacenamiento en la nube. ThingSpeak proporciona vistas instantáneas de los datos enviados por sus dispositivos a la base de datos de ThingSpeak a través de la plataforma web disponible para los usuarios. Por lo tanto, este trabajo usó la plataforma ThingSpeak para almacenamiento de datos en la nube.

2.1.3. Detección

Dos variables son esenciales para analizar la potencia: voltaje y corriente. El sistema FV empleado en este trabajo consta de un conjunto (secuencia) de cinco módulos PV en serie, totalizando 1,35 kWp. Algunas características técnicas de los módulos FV Jinkosolar se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características eléctricas del módulo FV utilizado en este trabajo

ITEM	STC	NOCT
<i>Potencia máxima (Pmax)</i>	270 Wp	200 Wp
<i>Voltaje para la potencia máxima (Vmp)</i>	31,7 V	29,4 V
<i>Corriente para la potencia máxima</i>	8,52 A	6,80 A
<i>Voltaje de circuito abierto (Voc)</i>	38,8 V	35,4 V
<i>Corriente de cortocircuito</i>	9,09 A	7,38 A
<i>Máxima corriente del fusible en serie</i>	15 A	15 A

STC - Condiciones de la prueba estándar
 NOCT - Temperatura nominal de operación de la celda

La medición del voltaje de los módulos se hizo en la entrada DC del inversor. El voltaje de circuito abierto, el voltaje más alto suministrado por el sistema, puede calcularse mediante la Ecuación (1):

$$V_{OUTPUT(max)} = 5 * 38,8 = 194V \tag{1}$$

La diferencia de voltaje generada por la secuencia en el panel FV (V_{FV}) se mide mediante un divisor de voltaje. Si se toma en cuenta que el voltaje en la entrada analógica del ESP32 puede ser hasta 3,3 V (V_{OUT}), los resistores del divisor de voltaje pueden calcularse utilizando la Ecuación (2):

$$R_1 = \frac{(V_{FV}V_{OUT})}{V_{OUTPUT(max)}}R_2 \tag{2}$$

Para este caso $R_1 = 57,78 * R_2$. R_1 y R_2 son resistores para el divisor de voltaje mostrado en la Figura 1.

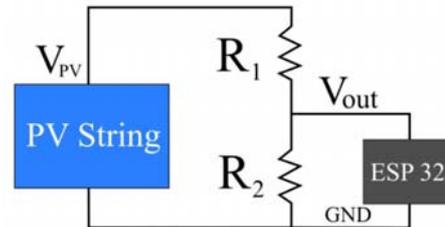


Figura 1. Esquema del divisor de voltaje usado en el sistema para leer el voltaje FV

El V_{out} está conectado directamente al pin ESP32 para medir el voltaje proporcional al voltaje de la secuencia del módulo FV. La relación entre ellos es $V_{PV} = 58,79 * V_{out}$.

La medición de corriente se hace con el módulo sensor de corriente ACS712-20A. Este módulo se muestra

en la Figura 2, resaltando las conexiones de sus pines. El arreglo escogido para el sensor es entre la entrada DC del inversor y la caja de interruptores de circuito, de manera que la medición se haga en paralelo con el inversor y lo más cercana posible. Por lo tanto, el proyecto del sistema de detección mide la potencia suministrada por la secuencia FV, y la compara con la registrada por el inversor para validar el sistema.

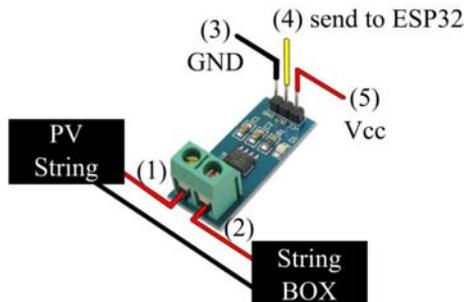


Figura 2. Esquemático de la instalación del ACS712-20A

Este sensor tiene una salida analógica con una ganancia de 66 mV/A, que puede ser leída en el pin de salida del módulo, indicado por el número (4) en la Figura 2. El voltaje de operación del módulo es 5 VDC (5). Los pines (1) y (2) corresponden a la entrada DC del inversor y al interruptor del circuito de la caja de secuencia. El pin (3) corresponde a la referencia cero de la fuente (GND) que alimenta al sensor.

2.1.4. Data suministrada por el inversor

El inversor utilizado en este trabajo para comparar y validar el sistema con hardware es el modelo PHB1500-NS, del fabricante PHB (2020). Este equipo tiene un sistema de monitoreo wifi con data en tiempo real disponible para el usuario en la página del fabricante por medio de login y password. Algunas características de este inversor conectado a la red se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del inversor PHB1500- NS

DESCRIPCIÓN	VALOR
Potencia máxima	1950 W
Voltaje máximo	450 V
Voltaje inicial de generación (DC)	80 V
Corriente (DC) máxima	10 A
MPPT	1/1
Potencia AC	1500 W
Voltaje AC de salida	60 Hz; 220 V
Interfaz	Wi-Fi, USB and RS485

Note que este modelo tiene, además de las interfaces para configurar la operación, una interfaz wifi utilizada en el sistema de monitoreo, que envía la data recolectada al servidor del fabricante. El fabricante proporciona una página web para acceder a la data de generación recolectada por el inversor.

Con el sistema propuesto en este trabajo, es posible programar el protocolo de cómo la data se recolecta y se envía a la nube, permitiendo su integración con el servidor preferido por el usuario. De esta manera, el usuario puede programar el intervalo de tiempo en que quiere enviar esta data a cualquier servidor, por ejemplo, para investigar la detección de fallas con algoritmos inteligentes o cualquier investigación donde sea necesaria la adquisición de datos.

2.1.5. Programación del sistema embebido

El uso del hardware programable (ESP32) permite la selección de este tiempo de acuerdo con la necesidad del usuario y el servidor para enviar la data, permitiendo investigaciones futuras. El firmware desarrollado y grabado en el ESP32 consiste de una rutina para enviar el promedio de las mediciones cada minuto. Esto se muestra en el diagrama en la Figura 3.

Puede observarse en el diagrama de flujo de la Figura 3 que el programa comienza conectando el dispositivo al internet vía wifi para acceder al servidor NTP donde tienen acceso al tiempo local y, posteriormente, enviar el valor promedio de las mediciones a un servidor en la nube, el ThingSpeak en este caso, cada minuto.

El uso del ESP32 también permite reportar información acerca de la generación y fallas eventuales en tiempo real, de una manera personalizada. Sin embargo, este trabajo se centra en validar el sistema a través de la comparación con la data del inversor, dejando esta funcionalidad para trabajos futuros.

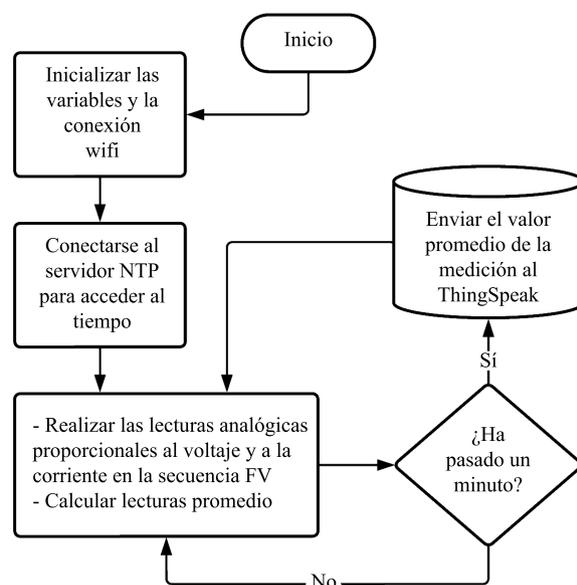


Figura 3. Diagrama de flujo del código fuente (firmware)

3. Resultados y discusión

Con el fin de asegurar la medición correcta de las variables eléctricas, voltaje y corriente, se realizaron pruebas para calibrar los sensores con el ESP32 con un multímetro digital, como se observa en la Figura 4.

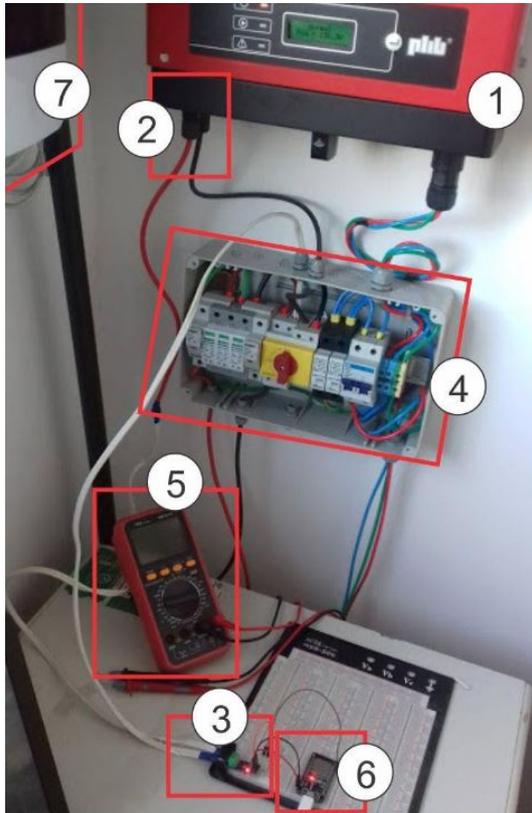


Figura 4. Esquema de la instalación del módulo sensor de corriente ACS712-20A

El sensor de corriente y el divisor de voltaje generan voltajes proporcionales a los valores de corriente y voltaje de la secuencia FV, respectivamente. Las pruebas buscan calibrar el sensor de corriente y el divisor de voltaje con resistores para asegurar la correcta proporcionalidad entre el valor enviado al ESP32 y el valor de corriente y voltaje generado por la secuencia FV. Una vez calibrados, esta data se compara con los valores de voltaje y corriente leídos y almacenados por el inversor comercial del sistema FV.

El montaje que se observa en la Figura 4 muestra el sensor de corriente (3) en serie con un multímetro (5) entre la entrada DC (2) del inversor (1) y la caja de protección (4), que contiene interruptores de circuito y el interruptor principal. La corriente, generada por la secuencia FV, pasa a través de la caja protectora y es leída por el sensor, que a su vez envía un voltaje proporcional a la corriente a uno de los puertos de entrada analógicos de la tarjeta de desarrollo ESP-WROOM-32 (6). Este sistema será instalado en un marco de protección fijado a la pared (7), para albergar el sistema

desarrollado en este trabajo. Este montaje constituye un prototipo inicial para ser probado en el laboratorio. Posteriormente, se ensambló una placa para extender las conexiones del ESP-WROOM-32 para el divisor de voltaje y el sensor de corriente, como se observa en la Figura 5.

Esta placa de extensión (Figura 5b) fue desarrollada para conectar el divisor de voltaje para adquirir el voltaje de la secuencia FV, y el sensor de corriente para adquirir la corriente generada por la secuencia FV, hacia el ESP32. La potencia para alimentar la tarjeta viene de una fuente externa de 5 V (Figura 5a) conectada a la tarjeta de desarrollo ESP-WROOM-32. El divisor de voltaje y el sensor de corriente fueron instalados dentro de la caja de protección y el interruptor principal presentado en el ítem 4 de la Figura 4, y conectados a la tarjeta de conexión del ESP32 vía un cable de red (Figura 5b).

Con el sistema IoT de bajo costo, desarrollado en este trabajo, es posible obtener data de corriente y voltaje generados por la secuencia de cinco módulos FV en serie, para compararlos con la data enviada a la nube por el inversor instalado en la planta FV. En la Figura 6 puede verse el gráfico comparativo entre los valores de corriente adquiridos por el inversor y el sistema IoT desarrollado en este trabajo.

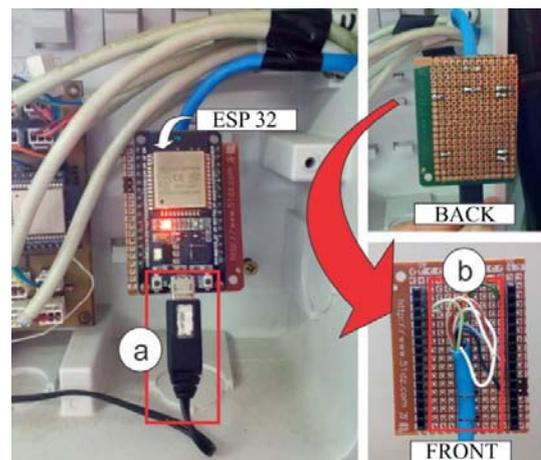


Figura 5. ESP32 y placa de extensión

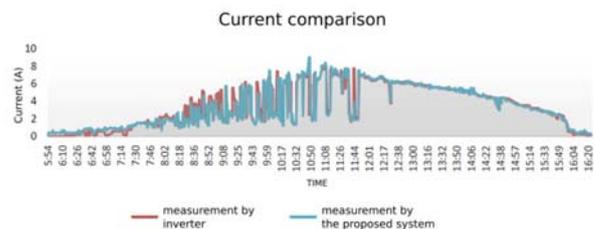


Figura 6. Comparación de corriente entre el inversor y el sistema propuesto

De forma similar a la corriente, la comparación de voltaje puede verse en la Figura 7.

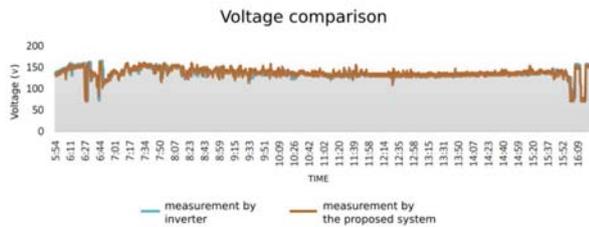


Figura 7. Comparación de voltaje entre el inversor y el sistema propuesto

A partir de la data recolectada por el inversor y el sistema de bajo costo, además de generar los gráficos mostrados en la Figura 6 y en la Figura 7, se calculó el error como la suma de una cantidad definida de la data recolectada por cada sistema en el mismo intervalo de tiempo. Se obtuvo un error porcentual menor a 1 % para corriente y voltaje a lo largo del día. En el día mostrado en los gráficos de la Figura 6 y la Figura 7, se observó un error de 0,26 % para el voltaje y de 0,56 % para la corriente.

4. Conclusiones

La investigación y uso de los sistemas IoT de monitoreo aplicados a microgeneración FV está creciendo de manera importante, y su desarrollo es necesario en la medida que los sistemas FV siguen convirtiéndose en una manera viable de generar electricidad. Los inversores FV modernos tienen tecnología IoT para enviar data de generación al servidor del fabricante. Sin embargo, con el sistema propuesto en este trabajo, es posible configurar cómo esta información es recolectada y dónde se publica en la nube, generando flexibilidad en la recolección de datos para investigaciones futuras.

En este trabajo se implementó un sistema didáctico de bajo costo utilizando la tarjeta de desarrollo con microcontrolador ESP32, el sensor de corriente ACS712-20A y los resistores del divisor de voltaje. Con el sistema en operación, la data recolectada fue comparada con la data suministrada por el inversor FV, permitiendo la validación del sistema propuesto.

De los resultados obtenidos, considerando que la validación arrojó un error menor a 1 %, puede concluirse que el sistema didáctico de bajo costo con el ESP32 puede ser usado para medir plantas FV similares a esta. Este sistema propuesto ayuda a enseñar conceptos tanto de IoT como de generación FV, y alienta a la comunidad académica a investigar sobre energías renovables en cursos técnicos y universitarios.

Para trabajos futuros, puede aplicarse inteligencia artificial a los datos para detectar fallas. Adicionalmente, el proyecto propuesto puede ayudar a medir y reportar a usuarios y mantenedores, en tiempo real y de manera personalizada, el desempeño y cualquier falla en la generación eléctrica de los sistemas FV analizados.

Finalmente, puede concluirse que es posible desarrollar y aplicar un sistema de monitoreo didáctico, con la calibración y validación apropiadas para asistir la investigación y enseñanza académica relacionadas con los sistemas IoT de monitoreo aplicados a plantas FV instaladas.

Referencias

- [1] A. M. Vallêra and M. C. Brito, “Meio século de história fotovoltaica,” *Gazeta de Física*, vol. 1, no. 2, p. 17, 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/2WgwXgP>
- [2] J. T. Pinho and M. A. Galdino, *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. CEPEL - CRESESB, 2014, vol. 1. [Online]. Available: <https://bit.ly/3OAYu3Z>
- [3] H. E. Murdock, D. Gibb, T. Andre, J. L. Sawin, A. Brown, L. Ranalder, U. Collier, C. Dent, B. Epp, and C. Hareesh Kumar, “Renewables 2021-global status report,” *Global ENR Report 2022*, 2021. [Online]. Available: <https://t.ly/PW1K>
- [4] B. Rubim, “Tudo o que você precisa saber sobre a revisão da ren 482,” *Ecoti Energia Solar*, vol. 20, p. 12, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3btlyTZ>
- [5] R. Vitalli, “Os 10 pilares de indústria 4.0 - artigos - indústria 4.0,” 2018, accessed: 2022-05-14. [Online]. Available: <https://t.ly/J9i6>
- [6] A. Prudenzi, A. Fioravanti, and M. Regoli, “A low-cost IoT solution for power availability improvement in hospitals,” in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'18), Salamanca (Spain), 21th to 23th March*, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24084/repqj16.389>
- [7] C. Gamarra, M. Ortega, E. Montero, and J. Guerrero, “Innovative planning synergies between manufacturing processes and microgrids,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 14, pp. 939–944, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24084/repqj14.526>
- [8] N. S. Kumar, B. Vuayalakshmi, R. J. Prarthana, and A. Shankar, “IoT based smart garbage alert system using Arduino UNO,” in *2016 IEEE region 10 conference (TENCON)*. IEEE, 2016, pp. 1028–1034. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TENCON.2016.7848162>
- [9] F. T. Brito, S. C. Jucá, and P. C. Carvalho, “Controllogger: A remote monitoring system

- for decentralized renewable energy sources,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 10, p. 432, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24084/repqj10.432>
- [10] R. I. Pereira, P. C. Carvalho, and S. C. Jucá, “Wifi data acquisition system and online monitoring applied to thermoelectric microgeneration modules,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, no. 13, pp. 1–6, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24084/repqj13.370>
- [11] A. Saveliev, D. Malov, M. Tamashakin, and V. Budkov, “Service and multimedia data transmission in IoT networks using hybrid communication devices,” in *MATEC Web of Conferences*, vol. 113. EDP Sciences, 2017, p. 02010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711302010>
- [12] J. Purba and D. Wahyudin, “Bluetooth low energy (ble) based power window system,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 384, no. 1. IOP Publishing, 2018, p. 012029. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/384/1/012029>
- [13] J. I. Vega-Luna, F. J. Sánchez-Rangel, G. Salgado-Guzmán, J. F. Cosme-Aceves, V. N. Tapia-Vargas, and M. A. Lagos-Acosta, “Red de monitorización para automatizar el sistema de enfriamiento de un centro de datos,” *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 24, pp. 87–96, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.09>
- [14] R. I. Pereira, S. C. Jucá, P. C. Carvalho, and C. P. Souza, “IoT network and sensor signal conditioning for meteorological data and photovoltaic module temperature monitoring,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 06, pp. 937–944, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TLA.2019.8896816>
- [15] A. Maier, A. Sharp, and Y. Vagapov, “Comparative analysis and practical implementation of the esp32 microcontroller module for the internet of things,” in *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*. IEEE, 2017, pp. 143–148. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926>
- [16] A. H. Abdullah, S. Sudin, M. I. M. Ajit, F. S. A. Saad, K. Kamaruddin, F. Ghazali, Z. A. Ahmad, and M. A. A. Bakar, “Development of esp32-based wi-fi electronic nose system for monitoring lpg leakage at gas cylinder refurbish plant,” in *2018 international conference on computational approach in smart systems design and applications (ICASSDA)*. IEEE, 2018, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSDA.2018.8477594>
- [17] I. Allafi and T. Iqbal, “Design and implementation of a low cost web server using esp32 for real-time photovoltaic system monitoring,” in *2017 IEEE electrical power and energy conference (EPEC)*. IEEE, 2017, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EPEC.2017.8286184>
- [18] S. B. Biswas and M. T. Iqbal, “Solar water pumping system control using a low cost esp32 microcontroller,” in *2018 IEEE Canadian conference on electrical & computer engineering (CCECE)*. IEEE, 2018, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCECE.2018.8447749>
- [19] V. Leite, J. Batista, F. Chenlo, and J. L. Afonso, “Low-cost instrument for tracing current-voltage characteristics of photovoltaic modules,” *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12)*, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24084/repqj10.565>
- [20] R. I. Pereira, I. M. Dupont, P. C. Carvalho, and S. C. Jucá, “IoT embedded Linux system based on Raspberry Pi applied to real-time cloud monitoring of a decentralized photovoltaic plant,” *Measurement*, vol. 114, pp. 286–297, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.033>
- [21] R. I. S. Pereira, S. C. Silveira Juca, and P. C. Marques de Carvalho, “Online monitoring system for electrical microgeneration via embedded wifi modem,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 7, pp. 3124–3129, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7587611>
- [22] E. Perge, “Practical application of computer software in visual education.” *Acta Didactica Napocensia*, vol. 1, no. 2, pp. 50–55, 2008. [Online]. Available: <https://bit.ly/39Nx4sZ>
- [23] M. Muttillio, T. de Rubeis, D. Ambrosini, G. Barile, and G. Ferri, “Sensor monitoring system for PV plant with active load,” in *2019 IEEE 8th International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI)*. IEEE, 2019, pp. 124–127. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IWASI.2019.8791248>
- [24] N. Rouibah, L. Barazane, A. Mellit, B. Haggi, and A. Rabhi, “A low-cost monitoring system for maximum power point of a photovoltaic system using IoT technique,” in *2019 International conference on wireless technologies, embedded and intelligent systems (WITS)*. IEEE, 2019, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723724>

- [25] R. I. Pereira, S. C. Jucá, and P. C. Carvalho, "IoT embedded systems network and sensors signal conditioning applied to decentralized photovoltaic plants," *Measurement*, vol. 142, pp. 195–212, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.085>
- [26] F. Harrou, A. Dairi, B. Taghezouit, and Y. Sun, "An unsupervised monitoring procedure for detecting anomalies in photovoltaic systems using a one-class support vector machine," *Solar Energy*, vol. 179, pp. 48–58, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.045>
- [27] F. R. Viera Alves, R. Carvalho de Sousa, and F. F. C. Fontenele, "Didactical engineering of the second generation: A proposal of the design and a teaching resource with the support of the geogebra software in brazil." *Acta Didactica Napocensia*, vol. 13, no. 2, pp. 142–156, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24193/adn.13.2.10>
- [28] F. R. V. Alves, "The professional didactics (pd) and didactics of sciences (ds) in brazil: some implications for the professionalization of the science teacher." *Acta Didactica Napocensia*, vol. 11, no. 2, pp. 105–120, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24193/adn.11.2.9>
- [29] W. Pavon, E. Inga, and S. Simani, "Optimal distribution network planning applying heuristic algorithms considering allocation of PV rooftop generation," *2020 IEEE Andescon, Andescon 2020*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272062>
- [30] RASPBERRY, "Buy a Raspberry Pi - Raspberry Pi," accessed: 2022-06-16. [Online]. Available: <https://t.ly/66e0>
- [31] I. Costa, J. R. Sousa, S. C. Jucá, R. Pereira, and A. Alexandria, "Monitoramento iot de planta de bombeamento fotovoltaico utilizando sistema embarcado linux," *Enciclopedia Biósfera*, vol. 18, no. 37, pp. 349–363, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.18677/EnciBio_2021C30
- [32] ARDUINO, "Arduino hardware | Arduino," 2022, accessed: 2022-06-16. [Online]. Available: <https://t.ly/2qmR>
- [33] ESPRESSIF, "Development boards | Espressif systems," accessed: 2022-06-16. [Online]. Available: <https://t.ly/mIGV>
- [34] AWS, "AWS IoT - internet of things - Amazon web services," 2022, accessed: 2022-05-02. [Online]. Available: <https://t.ly/gyWf>
- [35] CLOUDMQTT, "Cloudmqtt - hosted message broker of internet of things," accessed: 2022-05-02. [Online]. Available: <https://t.ly/FTrN>
- [36] UBIDOTS, "IoT platform | internet of things | ubidots," accessed: 2022-05-02. [Online]. Available: <https://t.ly/RyIE>
- [37] THINGSPEAK, "IoT analytics - thingspeak internet of things," accessed: 2022-05-02. [Online]. Available: <https://t.ly/tnqU>



PLATAFORMA DE ENSEÑANZA A DISTANCIA DE MICROCONTROLADORES E INTERNET DE LAS COSAS

PLATFORM FOR DISTANCE LEARNING OF MICROCONTROLLERS AND INTERNET OF THINGS

Renata Pereira^{1,*} , Cleonilson de Souza² , Darwin Patiño³ , Juan Lata⁴ 

Recibido: 06-06-2022, Recibido tras revisión: 14-06-2022, Aceptado: 21-06-2022, Publicado: 01-07-2022

Resumen

Debido al creciente desarrollo tecnológico de los sistemas embebidos y el internet de las cosas (IoT), los dispositivos basados en microcontroladores se aplican cada vez más en diversas áreas del conocimiento. En este contexto, las plataformas y productos educativos online se consideran laboratorios virtuales remotos, ya que los estudiantes pueden acceder a los dispositivos físicos en cualquier lugar siempre que dispongan de un sistema informático conectado a internet. En este sentido, este trabajo describe el diseño y desarrollo de una plataforma con cuatro productos educativos en línea para la enseñanza de microcontroladores e IoT. Estos productos educativos están basados en software de código abierto, lo que permite su distribución gratuita en línea y el acceso a ellos desde un servidor en la nube. El enfoque de código abierto y multiplataforma (Linux, Windows® y Mac OSX) permite una mayor interacción y accesibilidad del usuario. Los productos educativos en línea hacen posible la programación del firmware del microcontrolador ESP32 de forma remota a través de OTA (*Over the Air*) y de sistemas embebidos Linux basados en Raspberry Pi (Rpi), permitiendo aplicaciones virtuales de laboratorio de microcontroladores. Además, los productos educativos en línea permiten manipular los pines vía internet a través de la interfaz gráfica de los microcontroladores ESP32 y ESP8266, así como del Rpi. Como resultado, se probó la plataforma en línea propuesta, ejecutándola en un servidor en la nube, y se validaron los cuatro productos educativos de aprendizaje a distancia y la aplicación real de microcontroladores e IoT, que se encuentran operativos, tal como fueron diseñados.

Palabras clave: plataforma, educación a distancia, microcontrolador, internet de las cosas, sistemas embebidos, laboratorio virtual

Abstract

Due to the increasing technological development in embedded systems and the Internet of Things (IoT), devices based on microcontrollers are being increasingly applied in various areas of knowledge. In this context, online educational platforms and products are considered virtual remote laboratories, because students can access the physical devices anywhere as long as they have a computer system connected to the internet. In this sense, this work describes the design and development of a platform with four online educational products for teaching microcontrollers and IoT. These educational products are based on open-source software, which enables their free online distribution and the access to them from a cloud server. The open-source and multiplatform (Linux, Windows®, and Mac OSX) approach enables a greater user interaction and accessibility. The online educational products make possible the remote programming of the ESP32 microcontroller firmware via OTA (over the air) and Linux embedded systems based on Raspberry Pi (Rpi), enabling virtual microcontroller laboratory applications. In addition, the online educational products enable the manipulation of GPIO pins via the Internet through the graphical interface of the ESP32 and ESP8266 microcontrollers and the Rpi. As a result, the proposed online platform was tested, running it on a cloud server, and the four-distance learning educational products and the actual microcontroller and IoT application have been validated, and are operating as designed.

Keywords: platform, distance learning, microcontroller, Internet of Things, embedded systems, virtual laboratory

¹ Electronics, Federal Institute of Alagoas, Alagoas, Brazil. Autor para correspondencia ✉: renata.pereira@ifal.edu.br

² Electrical Engineering, Federal University of Paraíba, Paraíba, Brazil.

³ Electrical Engineering, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.

⁴ Electrical Engineering, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador.

1. Introducción

La pandemia de la COVID-19 demostró que el proceso de enseñanza-aprendizaje en instituciones educativas fue obstaculizado por la falta y la necesidad de clases presenciales. Varias estrategias se han implementado en las escuelas y universidades para reducir el impacto negativo sobre el aprendizaje de los estudiantes y la continuidad de la educación [1, 2]. Adoptar prácticas a distancia se ha convertido en una parte crucial de la enseñanza, especialmente en cursos de Ingeniería, Ciencias y Tecnología. Así, este artículo describe una herramienta didáctica que permite la implementación de prácticas en línea de microcontroladores y el internet de las cosas [3].

Debido al creciente desarrollo tecnológico en las áreas de sistemas embebidos y el internet de las cosas, los dispositivos basados en microcontroladores se aplican cada vez más en diversas áreas del conocimiento tales como control de motores, sistemas de seguridad, sistemas de control de elevadores [4], monitoreo de generación eléctrica [5] y en investigación científica aplicada [6]. Por lo tanto, la enseñanza de tópicos como sistemas embebidos, microcontroladores e IoT se hace cada vez más relevante en cursos de Ciencias e Ingeniería.

Dado que los productos de educación en línea basados en microcontroladores e IoT se utilizan sobre el Internet, es posible realizar prácticas de enseñanza remota de estos productos. De esta manera, las plataformas y los productos educativos en línea se consideran laboratorios remotos, dado que los estudiantes pueden acceder a dispositivos físicos desde cualquier lugar siempre que tengan un sistema informático con acceso a internet [7, 8].

1.1. Trabajos relacionados

La computadora de placa única, conocida como Raspberry Pi (Rpi), empleada en la plataforma educativa de enseñanza a distancia propuesta en este trabajo, fue desarrollada por la Raspberry Pi Foundation para ayudar a niños y adultos a aprender en el área de computación. El Raspberry Pi es una computadora portátil de bajo costo basada en *software* libre e interfaces para varios periféricos. Otras características son 1 GB de RAM compartida con un GPU (unidad de procesamiento gráfico, *Graphics Processing Unit*, en inglés), núcleo gráfico VideoCore IV 3D, 40 pines de entrada/salida de propósito general (*general-purpose input/output*, GPIO, por sus siglas en inglés), cuatro puertos con interfaz USB 2.0 para conectar el teclado y el ratón en computadoras de escritorio, puerto HDMI (interfaz multimedia de alta definición, *High Definition Multimedia Interface*, en inglés), puerto Ethernet con interfaz RJ-45, interfaz de tarjeta 56 micro SD (digital segura, *Secure Digital*, en inglés), interfaz de cámara y

monitor, así como también fuente de poder de 5 V y salida de audio [9].

Para desarrollar productos educativos en línea basados en RPi, se utilizan un conjunto de librerías y paquetes para asegurar la comunicación entre todos los componentes del sistema. Entonces, los protocolos Rpi SSH (*Secure Shell*) y VNC (*Virtual Network Computing*) que permiten el acceso a la consola y al ambiente gráfico, respectivamente. El SSH es un protocolo que permite la comunicación segura entre dos sistemas usando una arquitectura cliente/servidor, y permite a los usuarios conectarse a un host remoto. A diferencia de otros protocolos remotos tales como FTP (protocolo de transferencia de archivos, *File Transfer Protocol*, en inglés) o Telnet, el SSH encripta la sesión de acceso, haciendo virtualmente imposible para intrusos obtener claves descriptadas [10].

El paquete Samba, una implementación de código abierto del protocolo SMB (*Server Message Block*), fue instalado y configurado para asegurar la interconexión entre computadores que están ejecutando los sistemas operativos Microsoft Windows y Linux, y compartir archivos y carpetas [11].

La librería WiringPi C fue utilizada para los programas en lenguaje C del Rpi; esta librería puede usarse para programar y configurar los pines GPIO [12]. Por lo tanto, para compilar programas escritos en lenguaje C se tiene el compilador GCC (*GNU Compiler Collection*), que es una distribución accesible e integrada de compiladores para lenguajes de programación tales como C, C++, C#, y Java [13].

También se usó la librería CURL como una herramienta de línea de comando de código abierto para la construcción de sintaxis URL y la transferencia de datos a la nube [14].

El microcontrolador ESP32 IoT fue lanzado por la compañía china Espressif Systems, un fabricante de antenas wifi embebidas y módulos IoT con *software* y *hardware* libre [15]. El ESP32 es un microcontrolador (MCU) de 32 bits de baja potencia, con wifi/Bluetooth, núcleo dual y modo dual. El MCU ESP32 tiene una frecuencia de 240 MHz y un poder de procesamiento de 600 DMIPS (*Dhrystone* millones de instrucciones por segundo).

Por otra parte, comparado con el modelo más reciente, el microcontrolador de 32 bits ESP8266 NodeMCU IoT con antena wifi es una versión anterior y más simplificada, también lanzada por Espressif [16].

El microcontrolador PIC (*Peripheral Interface Controller*) es un circuito integrado que contiene toda la circuitería necesaria para instalar un sistema digital programable completo en un único dispositivo. Esta plataforma de enseñanza también utiliza el microcontrolador PIC18F2550 de 8 bits producido por Microchip Technology.

El módulo convertidor analógico a digital (ADC) del PIC18F2550 tiene diez entradas, y es capaz de

medir el voltaje analógico en cada canal y convertir el voltaje medido en un valor digital de 10 bits [17].

En este contexto, la tecnología IoT permite la comunicación entre dispositivos sin intervención humana [18, 19] y entiende que cada dispositivo es autónomo y está conectado a internet. Tales dispositivos pueden interactuar y comunicarse automáticamente, maximizando la modularidad, confort, conveniencia, seguridad y ahorro de energía [20]. Se usa típicamente una base de datos para almacenar data en la nube para poner en marcha sistemas IoT. Para este propósito, la computación en la nube proporciona acceso a una *pool* compartido de recursos computacionales configurables, tales como bases de datos no relacionales, sin requerir un conocimiento profundo de tecnologías de gestión [21, 22]. El modelo de nube simplifica la instalación, operación y mantenimiento de sistemas de información, incrementando la eficiencia y la confiabilidad del sistema y reduciendo costos.

Los sistemas nube pueden clasificarse de acuerdo con el modelo de desarrollo o de servicio, que pueden ser públicos, privados, comunitarios o híbridos. Los modelos nube de servicio son plataforma como un servicio (*Platform as a Service*, PaaS, por sus siglas en inglés), *software* como un servicio (*Software as a Service*, SaaS, por sus siglas en inglés) o infraestructura como un servicio (*Infrastructure as a Service*, IaaS, por sus siglas en inglés). En este trabajo se utiliza PaaS, que consiste en el uso de herramientas y recursos para proveer servicios para usuarios finales, los estudiantes. Dado que los usuarios finales comparten información en el mismo servidor en la nube, la privacidad y confidencialidad de los datos son las principales preocupaciones. Por lo tanto, los productos educativos de la plataforma de aprendizaje hacen posible que la data almacenada esté segura y encriptada, permitiendo ser administrada solo por el estudiante propietario.

Así, para escribir y leer data variable en la nube, la plataforma propuesta de aprendizaje a distancia usa *Firebase Realtime Database*, que es una base de datos NoSQL, es decir, que no tiene como estándar el sistema de tablas y relaciones entre datos, y donde la data se almacena como objetos JSON [23]. Adicionalmente, la plataforma didáctica en línea para aprendizaje a distancia sobre microcontroladores permite uso remoto en tiempo real por múltiples usuarios.

2. Materiales y métodos

2.1. Problema y metodología

Los dispositivos IoT requieren de manera creciente una rápida intervención para actualizar librerías y funcionalidades y mantener la seguridad de los ambientes en línea. Con este fin, actualizar rápidamente el firmware de estos dispositivos IoT es una manera efectiva de garantizar la seguridad de los datos. Así, la

plataforma instruccional de aprendizaje a distancia utiliza actualizaciones del firmware IoT vía Over-The-Air (OTA). La actualización del *firmware* OTA se realiza vía HTTP, lo cual permite descargar un archivo binario de un servidor en la nube para actualizar el firmware de los microcontroladores remotamente. La actualización del OTA a través de internet se instala típicamente de dos maneras: (i) Si está disponible una versión más nueva del firmware, el dispositivo consulta periódicamente al servidor que contiene el archivo binario compilado (*pull*) u otro servicio de activación en línea, tal como *Firebase*. (ii) El dispositivo recibe una notificación de una nueva versión del *firmware* a través de la nube (*push*), por ejemplo, vía MQTT, y realiza la actualización. El servidor almacena la versión más reciente del firmware en binario, y luego la URL variante en el tiempo del archivo binario, lo cual es más seguro y flexible que una dirección fija predefinida, se envía al microcontrolador para descarga [24]. En este tópico, se presentan los productos educacionales en línea de la plataforma didáctica de aprendizaje a distancia sobre microcontroladores e internet de las cosas.

3. Resultados y discusión

Este artículo ilustra un producto educativo para actualizar los códigos de los microcontroladores ESP32 y ESP266 con el mismo firmware genérico se emplea <http://sanusb.org/espupdate>. Se ha instalado la versión libre de *Firebase* (Google's JSON object database) para generar la activación de una actualización asíncrona en la nube para archivos .bin, como se ilustra en la Figura 1.

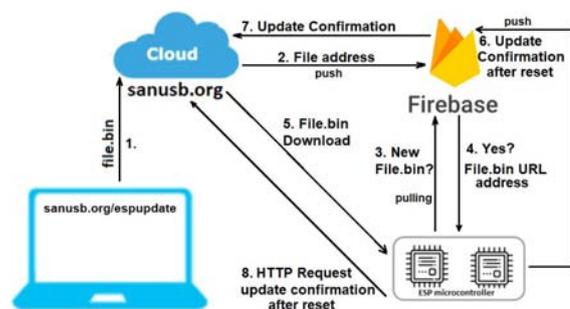


Figura 1. Ilustración de la operación del ambiente Espupdate

La actualización (OTA) transmite los archivos binarios .bin compilados a una computadora remota a través de internet, activando las aplicaciones virtuales del laboratorio de microcontroladores. Para realizar esta actualización de firmware en la nube, los usuarios deben escribir en el firmware solo el SSID, la clave, y el mismo nombre de perfil ingresado en el sitio web <http://sanusb.org/espupdate> y al subir el archivo .bin en el sitio web se actualiza remotamente

el firmware de los microcontroladores ESP a través de internet. El nombre de perfil de usuario ingresado en sanusb.org/espupdate puede ser alfanumérico.

Es posible probar este producto webcast educativo en diferentes redes accediendo al sitio web <http://sanusb.org/espupdate/> a través de la red de laboratorio o doméstica, y de los microcontroladores ESP32 o ESP8266 acoplado al teléfono inteligente conectado a la red móvil 4G y viceversa.

Vale la pena considerar que, a través de pruebas realizadas, se observó que para los archivos .bin compilados con el mismo nombre y descargas secuenciales para la actualización en la nube, puede ocurrir que el microcontrolador ESP no descarga el último archivo .bin enviado para actualización, sino un archivo .bin previamente cargado, dado que tienen el mismo nombre y URL de descarga.

Por esta razón, en este proyecto el nombre de los archivos .bin cargados al sitio tienen nombres basados en el tiempo de carga, así como también en la dirección URL de descarga; esto evita que se descargue un archivo previamente cargado u otro archivo con el mismo nombre, al generar una URL única y sin pareja. En este caso, para la versión del nombre y la dirección de descarga del archivo .bin, es año, mes, día, tiempo, y el orden cíclico de carga [25].

Una vez que se ha completado la actualización del archivo .bin y que el microcontrolador se ha reiniciado automáticamente, se envía el nuevo código de verificación a http://sanusb.org/espupdate/*Profile*/ para confirmar la actualización en el sitio web. Es importante notar que para utilizar EspUpdate no es necesario abrir puertos en el enrutador o habilitar permisos en el cortafuegos.

3.1. Producto educativo ESPGpio

El producto educativo denominado ESPGpio permite cambiar el nivel lógico de los pines de los microcontroladores ESP32 y ESP266 que pueden ser programados con el firmware de código abierto [26]; dichos pines se ilustran en la Figura 2 a través del acceso gráfico disponible en sanusb.org/esp. El nombre de perfil de usuario ingresado en sanusb.org/espgpio puede ser alfanumérico.

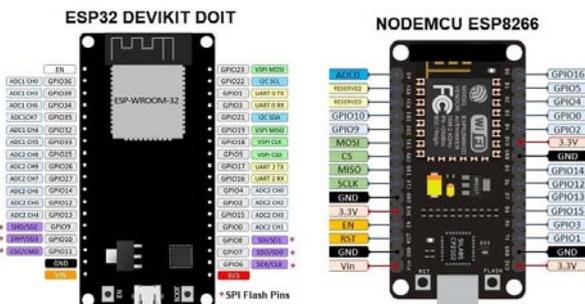


Figura 2. Ilustración de los pines GPIO del ESP32 y del ESP8266

La Figura 3 muestra una ilustración de la operación automática del entorno ESPGPIO. En este caso, se utiliza una celda de Firebase para compartir entre el controlador y el entorno gráfico de usuario. Un entero par se representa por una suma de 2; este es elevado a la potencia correspondiente al número de pines activados.

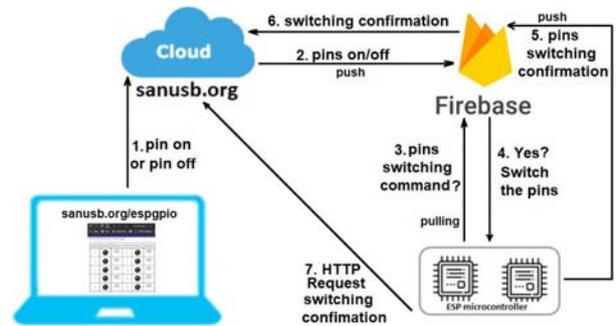


Figura 3. Ilustración los pines GPIO de un ESP32 o ESP8266

El entorno gráfico generado en sanusb.org/espgpio, ilustrado en la Figura 4, tiene treinta pines GPIO que el usuario debe seleccionar para la conmutación de carga a través de relés o dispositivos electrónicos tales como LED. Es importante notar que, si existe un fallo eléctrico o caída de voltaje, el estado de los últimos pines retorna a normal cuando se restaura la caída de voltaje, así como el estado de los pines es actualizado y consultado en Firebase, que es una base de datos persistente.

Después de completar el cambio en el estado de los pines, el nuevo estado del pin se indica con color verde en el entorno gráfico http://sanusb.org/espgpio/*Profile/, si está a un nivel lógico alto, como se ilustra en la Figura 4, donde *Profile* es el perfil dado por el usuario.

Esp Graphical pins cloud page

GPIO	Status	Action	GPIO	Status	Action
1	⏻	On	2	⏻	Off
3	⏻	On	4	⏻	Off
5	⏻	Off	6	⏻	On
7	⏻	On	8	⏻	On
9	⏻	On	10	⏻	On

Figura 4. Ilustración del entorno gráfico de los pines GPIO del ESP 32 y ESP8266

Es importante notar que se recomienda evitar el pin GPIO 1 en el ESP8266 Nodemcu, que es el pin Tx, ya que este previene la comunicación de depurado del programa por el monitor serial, y los pines GPIO 6 a 11 del ESP32 Devkit, usados para grabación flash.

3.2. Producto educativo RPI GPIO

El producto educativo RPI GPIO es similar al ESPGpio, pero utilizado para cambiar el estado de los pines lógicos en la tarjeta Raspberry Pi. La Figura 5 muestra la ilustración de los pines de una Raspberry Pi.

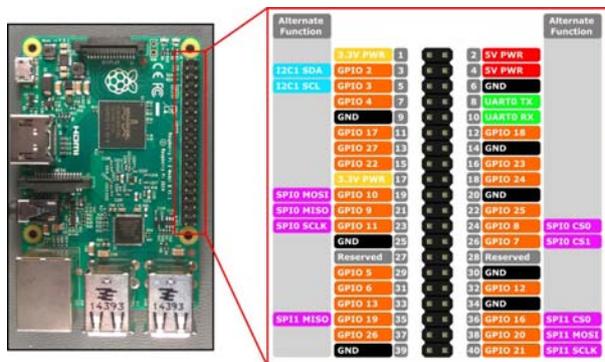


Figura 5. Ilustración de los pines GPIO de una Raspberry Pi

Después de crear el perfil en sanusb.org/gpio, se genera una página con enlaces a páginas para acceder a los pines del Rpi y los botones del firmware para la aplicación de extracción y la aplicación de inserción en el lenguaje bash shell, como se ilustra en la Figura 6.

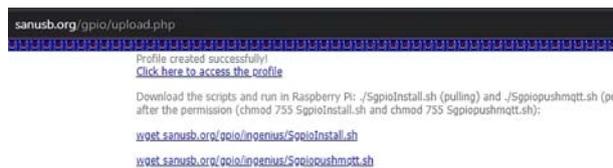


Figura 6. Enlace a páginas con botones de pines y programas para la Rpi

Tanto para la aplicación completa como para la aplicación push, es necesario, después de descargar los programas, otorgar permiso en el terminal como superusuario (sudo su) y ejecutar el permiso con los comandos `chmod 755 SgpioInstall.sh` para la aplicación pull y `chmod 755 Sgpiopushmqtt.sh`, para la aplicación push [27]. Al hacer clic en el enlace del perfil, se genera una página con botones que representan cada uno de los pines I/O de una Rpi, como se ilustra en la Figura 7.

En el caso del pull, al hacer clic en el botón de un pin físico dado se envía un comando a un archivo contenido en el perfil en línea, consultado periódicamente por el script `Sgpiointall.sh` que está operando

en el Rpi. En el caso del push MQTT, al hacer clic en el botón se envía un comando publish al bróker `mqtt.eclipse.org` sobre el tópico con el mismo nombre del perfil de usuario, laese en el caso del ejemplo, y descarga este comando al Rpi que está operando el script `Sgiopushmqtt.sh` con suscripción (`subscribe`) al mismo tópico.

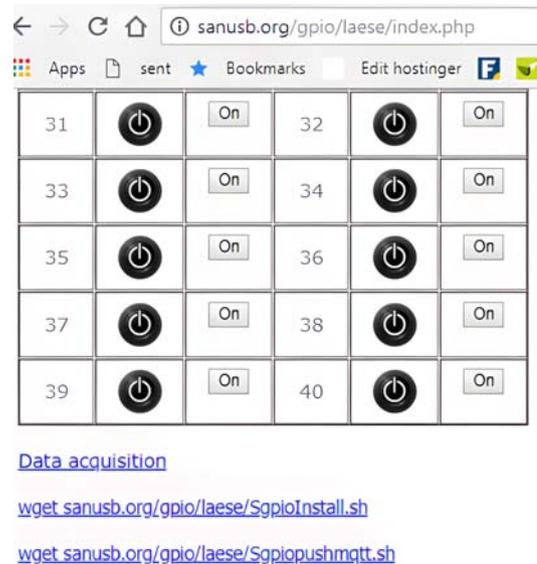


Figura 7. Ilustración del entorno gráfico de los pines GPIO del Raspberry Pi

Con el entorno RPI GPIO es posible crear una aplicación IoT utilizando una computadora portátil o un teléfono inteligente para, por ejemplo, controlar la activación de electrodomésticos vía internet, tal como en ventilador vía un relé, como se ilustra en la Figura 8. En este caso se tiene un Raspberry Pi Zero, también accesible vía internet. Como puede observarse, para usar el entorno `sanusb.org/gpio` es necesario crear inicialmente un perfil. Después de completar el perfil, se genera un enlace para acceder a una página con botones, y cada botón corresponde a un pin del dispositivo Raspberry Pi IoT [27].

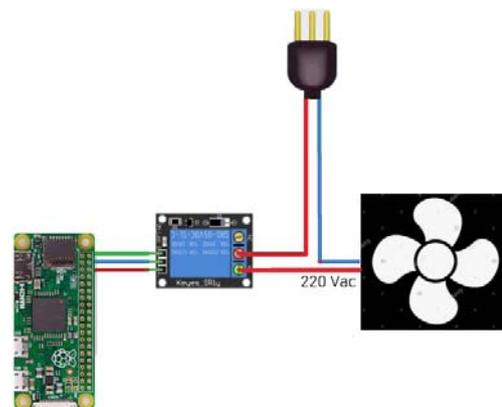


Figura 8. Ilustración de un circuito para operación IoT de un ventilador con Raspberry Pi

3.3. Producto educativo IOTUS

El producto educativo IOTUS (IoT *update system*, sistema de actualización IoT en español) es una PaaS, es decir, una plataforma como servicio en la cual el usuario puede crear un perfil y actualizar scripts en C, Python o lenguaje shell en el sistema embebido Linux basado en Rpi, y también actualizar el firmware en hexadecimal de la familia de microcontroladores PIC a través del puerto USB del Rpi [28], como se ilustra en la Figura 9.

Por tanto, IOTUS consta de tres partes principales, a saber: 1) Sistema embebido Linux basado en Raspberry Pi (ELS), 2) Sistema embebido de conversión analógico a digital (ADCES), el cual utiliza un microcontrolador SanUSB basado en una herramienta de *software* y *hardware* libre con la familia PIC18Fxx5X, incluyendo la interfaz USB nativa; y 3) Página web para la actualización automática en tiempo-real (carga) de scripts.

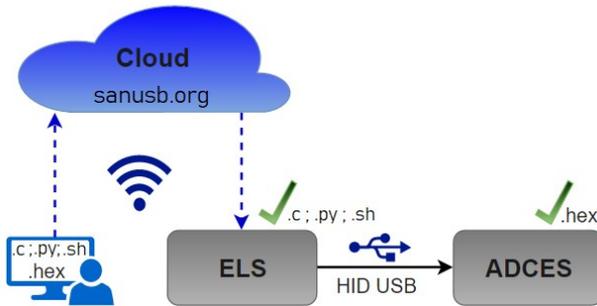


Figura 9. Actualización remota de firmware y script

El ADCES corresponde a la herramienta de desarrollo SanUSB de código abierto, ilustrada en la Figura 9. El SanUSB está constituido por *software* y *hardware* de código abierto de la familia PIC18Fxx5x con una interfaz USB nativa. Esta herramienta libre es eficiente en el desarrollo de proyectos porque no es necesario remover el microcontrolador para actualizar el firmware, a diferencia de otros sistemas de desarrollo que típicamente utilizan hardware específico de grabación y requieren una conexión cableada. Además, la herramienta SanUSB es una multiplataforma, es decir, puede ser empleada en Windows®, Mac OSX, y Linux, así como también es plug and play, es decir, es reconocida automáticamente por los sistemas operativos sin la necesidad de instalar ningún driver [29].

Por tanto, esta herramienta permite que la compilación, grabación y emulación de un programa sean realizadas de manera rápida y eficiente, conectando el microcontrolador a un sistema informático vía USB. Su aplicación es un RPi. El sistema informático ELS basado en RPi puede implantar diseños electrónicos directamente, debido principalmente a sus pines de entrada/salida de propósito general (GPIO) con soporte para sensores digitales y actuadores, y protocolos

I2C y SPI para establecer comunicaciones con los periféricos [30]. La variedad de comunicación permite al RPi comunicarse con un rango más amplio de periféricos, y la librería de acceso a los pines Wiring Pi, escrita en C, facilita la programación y configuración de los pines GPIO a través de la utilidad de línea de comando «gpio». Este trabajo tiene dos maneras de comunicación entre ADCES y RPi: comunicación serial e interfaz USB. Para poner en funcionamiento la comunicación serial entre un microcontrolador PIC y los pines RPi del ELS, se consideran los pines de tierra (GND), GPIO 14 (TX) y GPIO 15 (RX). En este trabajo, el sistema informático para registrar el microcontrolador PIC (ADCES) es el RPi (ELS), cuyos pines de conexión para la comunicación USB y serial se muestran en la Figura 10.

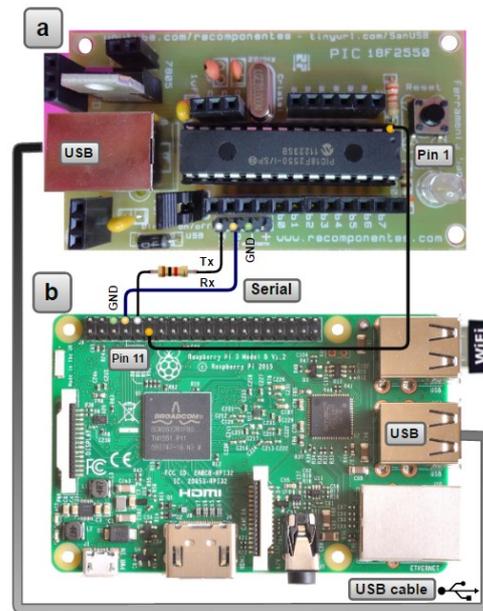


Figura 10. Conexión serial entre ADCES (tarjeta SanUSB) (a) y RPi (b)

Por lo tanto, se desarrolló una interfaz gráfica y un *software* de grabación para transferir directamente el firmware de la interfaz del sistema Linux embebido al PIC ADCES, utilizando el protocolo de comunicación del dispositivo de interfaz humana (HID, *Human Interface Device*, en inglés) a través del puerto USB. El ADCES propuesto es un sistema RISC embebido que permite actualizaciones en línea del firmware desde la nube. Los archivos pueden ser cargados remotamente para actualizar el firmware del ADCES (archivos .hex) y actualizar los scripts RPi (archivos .c, .py o .sh). Se requiere una conexión física entre el pin 11 del RPi y el pin 1 del ADCES para actualizar el ADCES. Los perfiles PaaS (PaaS A, B o N) ilustrados en la Figura 11 son libres y son generados automáticamente por el servidor en línea luego de registrado el perfil del usuario, donde es posible depurar y/o probar

una aplicación IoT. Así, cualquier usuario (A, B o N) puede crear y configurar un perfil IoT en la nube en tiempo real, y actualizar firmware y scripts a través de internet.

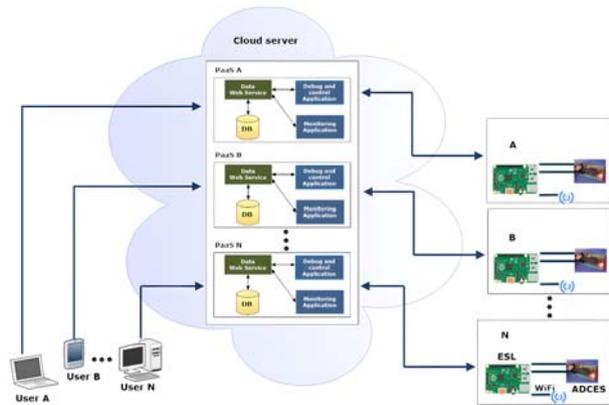


Figura 11. Perfil propuesto PaaS de IOTUS

El acceso a la página web <http://sanusb.org/iotus/sanusb.php>, ilustrado en la Figura 12, permite enviar y actualizar scripts en el ELS con extensiones de lenguaje en C (.c), Python (.py), scripts shell (.sh) y hexadecimal (.hex) en el ADCES a través del servidor. Debido a la latencia de la red, las direcciones de los archivos cargados al ELS y ADCES son variables y son renombradas con el perfil de usuario junto con la versión actualizada, que comienza con «0» y es incrementada en cada carga. Considerando la forma «ingenious», si el primer archivo es Python, será automáticamente renombrado como «ingenius0.py» e «ingenius1.py» será el nombre del script y, en consecuencia, de la nueva URL que se utiliza para descargar por el ELS.

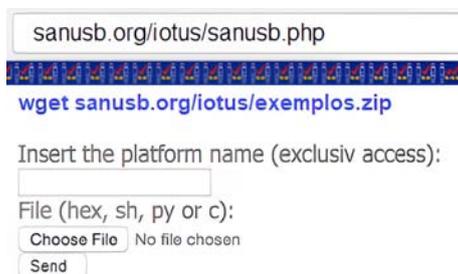


Figura 12. Actualización IoT de la página web

El IOTUS ha sido programado para cargar los archivos al servidor a través de la página <http://sanusb.org/iot/sanusb.php>, siguiendo estos pasos: 1. Ingreso del perfil del estudiante y por el ELS para descargar el archivo. 2. Buscar el firmware (.c, .py, .sh o .hex) que será enviado para la actualización automática. Pueden descargarse scripts de muestra desde sanusb.org/iotus/examples.zip. 3. El botón 'Submit' ejecuta la transferencia del archivo al servidor, el cual

es luego renombrado y transferido automáticamente al ELS. IOTUS está programado para operar de forma descentralizada y distribuida, permitiendo a múltiples usuarios y a múltiples comunicaciones simultáneas utilizar el mismo servidor en la nube. Luego de ingresar un nombre de perfil y enviar cualquier firmware, como se ilustra en la Figura 13, el `SloaderInstall.sh` es generado automáticamente y queda disponible para ser descargado.

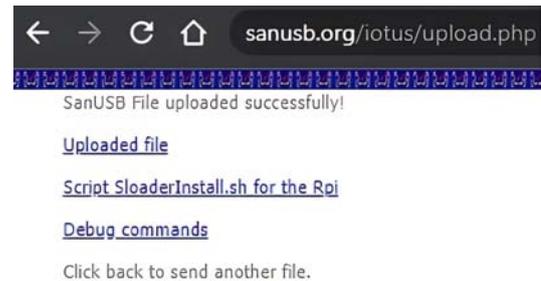


Figura 13. El sitio web con un enlace para descargar el script `SloaderInstall.sh`

Por lo tanto, para actualizar el firmware (.c, .py, .sh, or .hex) a través de la nube, es necesario ejecutar previamente el script `SloaderInstall.sh` en el ELS para revisar si hay nuevas actualizaciones de firmware en intervalos de tiempo definidos por el usuario, descargar el firmware actualizado y realizar una tarea específica de acuerdo con la extensión del archivo. En el arranque, el script `SloaderInstall.sh` verifica si las librerías requeridas por este producto educativo están instaladas, y si no, las instala en el Rpi. Si se envía un archivo «hexadecimal», el ELS escribe el archivo en el ADCES a través de la conexión cableada entre el pin 11 del Rpi y el pin 1 del ADCES. Si se envía un archivo «c», el ELS compila el script y luego ejecuta el archivo compilado. En el caso de un script shell o de un archivo creado en Python, el ELS ejecuta directamente el archivo en segundo plano. La Figura 14 ilustra el diagrama de flujo de la operación de verificación del `SloaderInstall.sh`.

Otra característica de la PaaS IOTUS propuesta es que para este producto educativo no es necesario desbloquear los puertos del enrutador y/o del cortafuegos. Como una aplicación para el IOTUS desarrollado, se utiliza un módulo fotovoltaico (PV, Photovoltaic, en inglés) que alimenta una carga de 50 W, con las siguientes especificaciones: Modelo YL95P-17b 2/3, Máxima Potencia 95 WP, Eficiencia 14,3 %, voltaje de circuito abierto (Voc, open circuit voltage) 22,5 V y corriente de cortocircuito (Isc, short circuit current) 5,59 A.

Las horas de sol para Fortaleza, en Brasil, donde fue instalado el sistema, son de 6 a. m. a 4 p. m. Las condiciones meteorológicas locales permiten una irradiación solar estable desde las 8 a. m. hasta las 2 p. m. (entre 800 y 1250 W/m²). Sin embargo, en este período

se midieron altas temperaturas del módulo PV, lo cual reduce la eficiencia de dicho módulo. Utilizando como ejemplo datos de enero, la Figura 15 muestra que la temperatura del módulo PV puede alcanzar valores desde 49 °C a las 8 a. m. hasta 62 °C al mediodía [31].

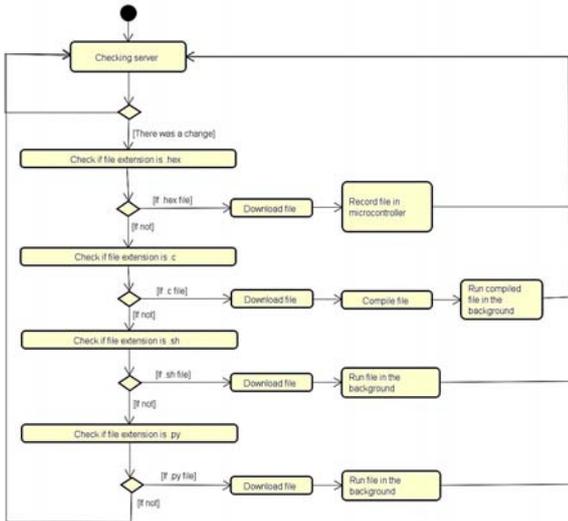


Figura 14. Diagrama de flujo de la operación del SloaderInstall.sh

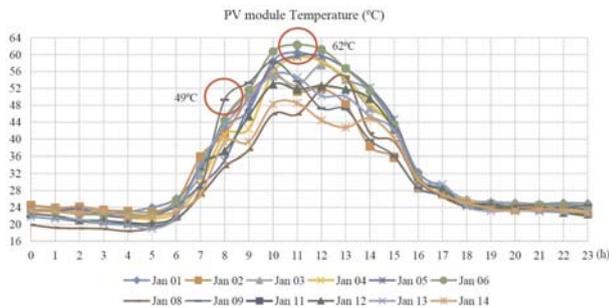


Figura 15. Temperatura del módulo PV en enero en Fortaleza-BR

Como una segunda aplicación, el sistema IOTUS ESP32 se valida usando un controlador lógico programable (PLC, *Programmable Logic Controller*, en inglés), con un canal AD de 12 bits de resolución [32]. La Figura 16 muestra la curva promedio mensual de la temperatura medida del módulo PV. Para valores de temperatura por encima de 52 °C, el error entre el monitoreo IoT propuesto usando ESP32 y el PLC aumenta aproximadamente 2 °C; para menores valores de temperatura, la medición sigue el valor de referencia. La Figura 17 muestra la correlación entre la temperatura del módulo PV medida por el monitoreo IoT y el valor de referencia del PLC para las mediciones promedio. Por medio de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE, *Root Mean Square Error*, en inglés), la correlación es 0,9989.

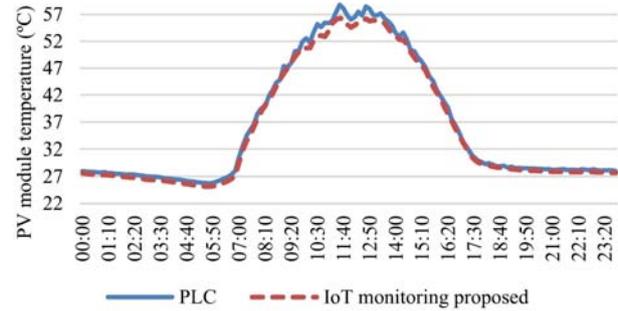


Figura 16. Temperaturas del módulo PV medidas por el monitoreo IoT propuesto y por el PLC

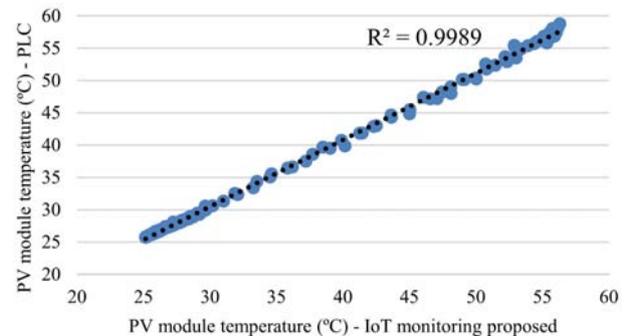


Figura 17. Correlación entre la temperatura del módulo PV medida por el monitoreo IoT propuesto y el valor de referencia del PLC

4. Conclusiones

Este trabajo describió el diseño y desarrollo de cuatro productos educativos en una plataforma en línea para el aprendizaje a distancia sobre microcontroladores e IoT; dichos productos fueron probados, validados y funcionaron de acuerdo con el diseño. Específicamente, el producto educativo propuesto ESP UPDATE permite la actualización de códigos de los microcontroladores ESP32 y ESP8266 en la nube, y es posible usarlo a través de internet en cualquier lugar y sobre cualquier dispositivo (computadora, teléfono inteligente), y esto permite aplicaciones virtuales de laboratorio de microcontroladores. El producto educativo ESPGPIO para ESP32 y ESP8266 y el RPI GPIO para Rpi permiten aplicaciones desde una computadora portátil o teléfono inteligente para controlar la activación de electrodomésticos a través de internet intuitiva e interactivamente.

IOTUS permite la grabación en línea de ADCES desarrollados con un microcontrolador PIC y la actualización de firmware en un sistema embebido Linux basado en un Raspberry Pi (ELS). El uso de *software* de código abierto y multiplataforma (Linux, Windows®, y Mac OSX) para enseñanza en línea permite mayor interacción y accesibilidad del usuario debido a

la posibilidad de libre distribución. Otra ventaja es que no es necesario desbloquear los puertos del enrutador y/o del cortafuegos cuando se utiliza el servicio de nube.

Finalmente, este artículo también presentó las principales características y ventajas de los microcontroladores en la plataforma en línea: bajo costo y el uso de *hardware* y *software* accesible. Rpi simplificó el procesamiento y proporcionó un circuito portátil teniendo Linux como sistema operativo y C como lenguaje de programación. El desarrollo de programas para las diferentes funcionalidades demostró la posibilidad de construir una solución efectiva y de bajo costo, donde el usuario puede agregar funcionalidades y configuraciones de acuerdo con sus necesidades. Adicionalmente, los productos educativos propuestos eliminan la necesidad de instalar en la computadora *software* para acceder al servidor de la plataforma educativa a distancia.

Referencias

- [1] C. Y. Yeh, Y. M. Cheng, and S. J. Lou, “An internet of things (IoT) maker curriculum for primary school students: Develop and evaluate,” *International Journal of Information and Education Technology*, vol. 10, no. 12, pp. 889–896, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18178/ijiet.2020.10.12.1475>
- [2] P. Jacko, M. Bereš, I. Kováčová, J. Molnár, T. Vince, J. Dziak, B. Fecko, Š. Gans, and D. Kováč, “Remote IoT Education Laboratory for Microcontrollers Based on the STM32 Chips,” *Sensors*, vol. 22, no. 4, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s22041440>
- [3] D. Sarpong, G. Ofori, D. Botchie, and F. Clear, “Do-it-yourself (DiY) science: The proliferation, relevance and concerns,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 158, no. May, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120127>
- [4] D. De Roeck, K. Slegers, J. Criel, M. Godon, L. Claeys, K. Kilpi, and A. Jacobs, “I would DiYSE for it! A manifesto for do-it-yourself internet-of-things creation,” *NordiCHI 2012: Making Sense Through Design - Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 170–179, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2399016.2399044>
- [5] J. L. Victor, S. C. Jucá, R. I. Pereira, P. C. Carvalho, and L. M. Fernández-Ramírez, “IoT monitoring systems applied to photovoltaic generation: The relevance for increasing decentralized plants,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 17, no. September, pp. 536–545, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24084/repqj17.368>
- [6] R. I. Pereira, M. M. Camboim, A. W. Villarim, C. P. Souza, S. C. Jucá, and P. C. Carvalho, “On harvesting residual thermal energy from photovoltaic module back surface,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 111, p. 152878, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.152878>
- [7] A. Morris and N. Lessio, “Deriving Privacy and Security Considerations for CORE,” *Internet of Things and Cloud-based Services Conference*, vol. 1, no. 1, pp. 2–11, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3267357.3267363>
- [8] D. Mijailovic, A. Dordevic, M. Stefanovic, D. Vidojevic, A. Gazizulina, and D. Projovic, “A Cloud-Based with Microcontroller Platforms System Designed to Educate Students within Digitalization and the Industry 4.0 Paradigm,” *Sustainability*, vol. 13, no. 22, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su132212396>
- [9] RaspberryPi Foundation, “Raspberrypi.” [Online]. Available: <https://bit.ly/3tXNSUY>
- [10] Red Hat, “Red Hat Enterprise Linux: Manual de referencia.” [Online]. Available: <https://bit.ly/3xSVdpV>
- [11] —, “Red Hat SSH.” [Online]. Available: <https://bit.ly/3NpD2OI>
- [12] Wiringpi, “Wiring Pi.” [Online]. Available: <https://bit.ly/39QkERe>
- [13] GCC, “GCC online documentation.” [Online]. Available: <https://bit.ly/3OioUFb>
- [14] CURL, “Command line tool and library for transferring data with URLs.” [Online]. Available: <https://curl.se/>
- [15] ESP, “ESP32 Series Datasheet,” *Espressif Systems*, pp. 1–65, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/2E6qqIt>
- [16] ESP8266EX, “ESP8266EX Datasheet,” *Espressif Systems*, p. 31, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2E6qqIt>
- [17] M. Technology, “USB Microcontrollers with nanoWatt Technology,” *Technology*, 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/3OEOKpk>
- [18] A. Kevin, “That ‘Internet of Things’ Thing,” *RFiD Journal*, p. 4986, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/3OdZmvI>

- [19] E. Inga, J. Inga, and A. Ortega, “Novel approach sizing and routing of wireless sensor networks for applications in smart cities,” *Sensors*, vol. 21, no. 14, pp. 1–17, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s21144692>
- [20] A. Peralta, E. Inga, and R. Hincapié, “Optimal Scalability of FiWi Networks Based on Multistage Stochastic Programming and Policies,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, no. 12, p. 1172, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3zZJicE>
- [21] H. Tabrizchi and M. Kuchaki Rafsanjani, *A survey on security challenges in cloud computing: issues, threats, and solutions*. Springer US, 2020, vol. 76, no. 12. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11227-020-03213-1>
- [22] E. Inga, M. Campaña, R. Hincapié, and O. Moscoso-Zea, “Optimal Deployment of FiWi Networks Using Heuristic Method for Integration Microgrids with Smart Metering,” *Sensors*, vol. 18, no. 8, pp. 1–21, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s18082724>
- [23] Firebase, “Firebase.” [Online]. Available: <https://bit.ly/3blnhLa>
- [24] S. E. Ooi, R. Beuran, and Y. Tan, “Secure IoT development: A maker’s perspective,” *2021 IEEE International Conference on Omni-Layer Intelligent Systems, COINS 2021*, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/COINS51742.2021.9524205>
- [25] Github, “SanUSB / EspCloudUpdate.” [Online]. Available: <https://bit.ly/3Nj8azh>
- [26] J. I. Vega Luna, F. J. Sánchez-Rangel, G. Salgado-Guzmán, J. F. Cosme-Aceves, V. N. Tapia-Vargas, and M. A. Lagos-Acosta, “Red de monitorización para automatizar el sistema de enfriamiento de un centro de datos,” *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 24, pp. 87–96, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.09>
- [27] S. Jucá and R. Pereira, “Aplicações práticas de sistemas embarcados Linux utilizando Raspberry Pi,” *PoD Editoria*, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3negu8Q>
- [28] Github, “SanUSB / IOTUS.” [Online]. Available: <https://bit.ly/3zWHxgx>
- [29] S. C. Jucá, P. C. Carvalho, and F. T. Brito, “A low cost concept for data acquisition systems applied to decentralized renewable energy plants,” *Sensors*, vol. 11, no. 1, pp. 743–756, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s110100743>
- [30] I. M. Dupont, P. C. Carvalho, S. C. Jucá, and J. S. Neto, “Novel methodology for detecting non-ideal operating conditions for grid-connected photovoltaic plants using Internet of Things architecture,” *Energy Conversion and Management*, vol. 200, no. September, p. 112078, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112078>
- [31] R. Pereira, I. Dupont, P. Carvalho, and S. Jucá, “IoT embedded linux system based on Raspberry Pi applied to real-time cloud monitoring of a decentralized photovoltaic plant,” *Measurement Journal*, vol. 114, pp. 286–297, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.033>
- [32] R. Pereira, S. Jucá, and P. Carvalho, “IoT embedded systems network and sensors signal conditioning applied to decentralized photovoltaic plants,” *Measurement*, vol. 142, pp. 195–212, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.085>



ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN BUS DE DOS PISOS DE LARGA DISTANCIA DURANTE COLISIONES

STRUCTURAL ANALYSIS OF A LONG-DISTANCE DOUBLE-DECKER BUS DURING CRASHES

Jimmy Brito Morocho¹ , Marco Amaya Pinos^{1,*} , Luis López López¹ ,
Fabricio Espinoza Molina¹ 

Recibido: 13-05-2021, Recibido tras revisión: 18-10-2021, Aceptado: 26-11-2021, Publicado: 01-07-2022

Resumen

Este estudio presenta un análisis de colisiones de impacto frontal y volcamiento lateral de un autobús de dos pisos, conforme al Reglamento 66 y 29 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UN/ECE), y el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) con su normativa 1323:2009, encargado de regular los autobuses para el transporte de pasajeros en el Ecuador. En la actualidad la mejora constante de la seguridad activa y pasiva de los autobuses con respecto a los accidentes es un tema de gran impacto social. En este contexto se analiza la colisión de un autobús de dos pisos aplicando el método de elementos finitos (MEF), el cual es sometido a diferentes escenarios de colisión como es de un impacto frontal y un volcamiento lateral, con la finalidad de estudiar los efectos de un accidente de este tipo de estructuras donde la normativa no es específica para esta clase de vehículos. Los resultados obtenidos permiten tener en cuenta consideraciones importantes al momento del diseño de estos elementos.

Palabras clave: colisiones, volcamiento, impacto frontal, reglamentación, energía, autobús

Abstract

This study presents an analysis of frontal impact and lateral overturn collisions of a double-decker bus, carried out in accordance with Regulations 66 and 29 of the United Nations Economic Commission of Europe (UN/ECE), and the Ecuadorian Standardization Service Institute (INEN) with its regulation 1323:2009. The INEN is on charge of regulating the buses for transportation of Ecuadorian passengers. The continuous improvement of active and passive safety of buses with respect to accidents, is currently a topic with great social impact. In this context, the present paper applies the finite element method (FEM) to analyze the behavior of a double-decker bus subject to different collision scenarios, such as frontal impact and lateral overturn, with the purpose of studying the effects of an accident of this type of structure, considering that the existing regulations are not specific for this kind of vehicles. The obtained results enable taking into account different considerations when designing these elements.

Keywords: Collisions, rollover, frontal impact, regulation, energy, bus

^{1,*}Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador. Autor para correspondencia ✉: mamaya@ups.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Brito Morocho, J.; Amaya Pinos, M.; López López, L. y Espinoza Molina, F. "Análisis estructural de un bus de dos pisos de larga distancia durante colisiones". *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*. N.º 28. pp. 63-70. 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.06>.

1. Introducción

El autobús es uno de los principales medios de transporte en el Ecuador debido a su eficiencia, flexibilidad en rutas de servicio y costos para el usuario; sin embargo, en el año 2018 este medio de transporte fue el responsable del 8 % de las colisiones de tránsito aportando de forma significativa al índice de accidentalidad y al número de víctimas [1]; por lo que existe un elevado interés en mejorar la seguridad activa como pasiva de los pasajeros debido a que los accidentes más frecuentes son los impactos frontales y volcamientos, los cuales son considerados como los de mayor gravedad y que generan un gran impacto social por las pérdidas humanas como económicas.

Los Estados Miembros de las Naciones Unidas en el año 2015 adoptaron la Agenda 2030 en donde se plantea diferentes objetivos sostenibles; donde se pretende que se pueda «lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles» [2], y con una meta para el 2030 que permita «proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación vulnerable, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad» [2].

Las iniciativas y normas internacionales elaboradas por organizaciones gubernamentales, sustentadas en la seguridad de los seres humanos que garanticen la integridad deben ser consideradas al generar nuevos sistemas de transporte público y optimizar los ya existentes. Por ejemplo, los autobuses de dos pisos tienen una gran masa y su centro de gravedad está situado en un punto muy elevado al nivel del suelo, lo que reduce significativamente la estabilidad y resistencia a una colisión y volcamiento. Si se establece que estas unidades de transporte de pasajeros recorren diversos trayectos con largas distancias, es relevante considerar todos los aspectos relacionados con la seguridad cuando se produzca un posible evento de colisión [3].

Entre los distintos tipos de accidentes en los que se encuentran involucrados de manera directa los autobuses, los más letales son los impactos frontales y los vuelcos laterales. En un estudio realizado por *Transport Canada* se muestra que los impactos frontales representan el 70 % de todos los accidentes de autobús. Además, es considerada una de las colisiones que provocan más muertes y lesiones graves que cualquier otro accidente. En estos impactos, donde se ven involucrados dos vehículos que se aproximan a una velocidad alta, la mayoría compromete la estructura frontal del vehículo [4].

En un estudio presentado por Ramírez *et al.* [1] también indican que los accidentes de tránsito de sistemas de transporte colectivo de personas que se pro-

ducen en carreteras son primordialmente colisiones de tipo frontal. Asimismo que, la diferencia entre masas y configuraciones de los vehículos durante un impacto, generan daños críticos tanto en la parte material y de lesiones graves hasta la pérdida de la vida de sus ocupantes.

La resistencia a las colisiones es la capacidad de la estructura para absorber la energía cinética del volcamiento o impacto frontal, los cuales deben proporcionar una adecuada protección a los ocupantes del vehículo durante un accidente de tránsito. Este criterio es importante especialmente en los vehículos de transporte de pasajeros como son los autobuses [5]. Esta es la razón por la cual las simulaciones que se efectúan en la superestructura del autobús tienen como finalidad analizar la cantidad de energía que absorben durante una colisión de impacto frontal y volcamiento lateral de un autobús de dos pisos. Aquella se debe deformar lo menos posible y evitar que algún elemento se introduzca en el espacio de supervivencia del autobús [6], conforme al reglamento 29 [7] y 66 de la UN/ECE [8] y la normativa NTE INEN 1323:2009 [9].

2. Materiales y métodos

El estudio planteado parte de un modelado en tres dimensiones considerando todos los detalles y medidas de la estructura del bus de dos pisos. Se utilizaron herramientas CAD con la finalidad de obtener el modelo final para las etapas de simulación por medio del MEF, para lo cual en el preproceso se usó Solidworks, mientras que para el proceso y posproceso Ansys – LS DYNA [10].

Para el estudio de volcamiento por medio del MEF de la estructura del autobús se fundamentó en la normativa NTE INEN 1323:2009 [9] y los Reglamentos 29 y 66 de la UN/ECE [7], [8]. Este último es pionero en aumentar la seguridad del transporte público, año tras año, al implementar reglamentos que permiten garantizar la seguridad de los ocupantes cuando un autobús sufra alguna colisión y no permita una invasión de la estructura al espacio de supervivencia de los pasajeros durante un volcamiento.

El reglamento 66 de la UN/ECE, en el ámbito de aplicación, menciona que solamente se aplica a vehículos de un solo piso, rígidos o articulados, pertenecientes a la categoría M2 o M3; los autobuses de dos pisos de acuerdo con la NTE INEN 1323 [9] y 2656 [11] pertenecen a la categoría M3; por lo expuesto, el ensayo de vuelco de un autobús de dos pisos puede aplicarse mediante la reglamentación 66, lo cual sustenta la aplicación de la normativa indicada en este estudio [8].

Una vez realizado el análisis de volcamiento se procedió a efectuar el estudio de una colisión frontal de la estructura, lo que permitió visualizar el efecto de este tipo de colisión en la deformación de la estructura y como esta invade el espacio de supervivencia [12].

2.1. Delimitación del espacio de supervivencia

El espacio de supervivencia presenta características geométricas mencionadas en el reglamento 66 de la UN/ECE considerando las dimensiones del autobús y debe estar situado en toda la longitud del mismo como se observa en la Figura 1. Allí se encuentran los pasajeros y los operarios; durante una colisión este espacio no debe ser invadido por la estructura de la carrocería o por cualquier accesorio que pueda afectar la integridad física de los ocupantes [8].

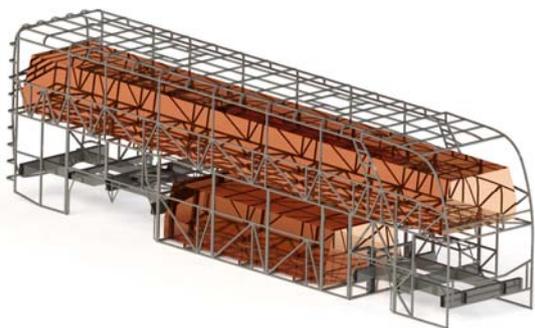


Figura 1. Modelado 3D del espacio de supervivencia dentro de los habitáculos de pasajeros del autobús

2.2. Condiciones de la superestructura del autobús

El anexo 4 de la Reglamentación 66 de la UN/ECE presenta las perspectivas de la descripción estructural de la superestructura del autobús; los perfiles y materiales estructurales deben estar en referencia a las normas nacionales o internacionales [8].

Los perfiles estructurales utilizados en la carrocería del autobús se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Perfiles estructurales del autobús

Perfil	Calidad	Normativa
R 80 × 40 × 2 mm	ASTM A-500	NTE INEN 1623
R 60 × 40 × 3 mm	ASTM A-500	NTE INEN 1623
R 60 × 40 × 3 mm	ASTM A-500	NTE INEN 1623
R 40 × 20 × 2 mm	ASTM A-500	NTE INEN 1623
C 50 × 50 × 3 mm	ASTM A-500	NTE INEN 1623

El anexo 9, literal 1.3 de la reglamentación 66 de la UN/ECE [8] indica que se deben cumplir con los datos necesarios para ejecutar el ensayo, en donde los valores de la masa, centro de gravedad y los momentos de inercia de la estructura del autobús deben ser obtenidos con anterioridad.

Los valores de la masa, momentos de inercia y centro de gravedad de la estructura del autobús se

muestran en la Tabla 2, y fueron obtenidos durante el proceso de modelado.

Tabla 2. Ficha técnica de la estructura del autobús

Parámetro	Valor
Masa de la estructura autobús	3632,73 kg
Posición longitudinal del CDG	6,78 m
Posición transversal del CDG	1,30 m
Altura transversal del CDG	1,48 m
I _{xx}	7,30179 × 10 ⁷ mm ⁴
I _{xy}	-7221,14 mm ⁴
I _{xz}	48267,2 mm ⁴
I _{yy}	7,09992 × 10 ⁷ mm ⁴
I _{yz}	-1,68985 × 10 ⁶ mm ⁴
I _{zz}	7,86809 × 10 ⁶ mm ⁴
I ₁₁	7,3018 × 10 ⁷ mm ⁴
I ₂₂	7,10443 × 10 ⁷ mm ⁴
I ₃₃	7,82286 × 10 ⁶ mm ⁴

La ubicación del centro de gravedad de la estructura del autobús debe estar definida de manera clara, como se muestra en la Figura 2.

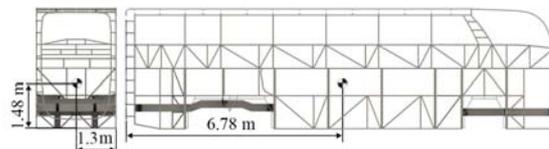


Figura 2. Ubicación del centro de gravedad en la estructura del autobús

2.3. Análisis por medio de elementos finitos

La exactitud de los métodos de elementos finitos depende de la cantidad de nodos y elementos como se observa en la Figura 3, entre los cuales dependen del tamaño y de los tipos de componentes de la malla, por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados del análisis [13].

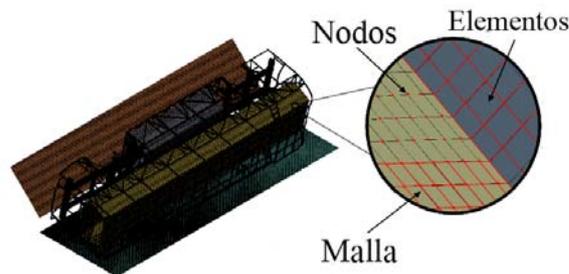


Figura 3. Nodos y elementos de una malla

Para realizar el mallado de la estructura del autobús hay que tener en cuenta aspectos importantes

como la calidad y el tipo de mallado, que están relacionados con la densidad de la malla utilizada que, para este caso de estudio, es de 20 mm, utilizando un método de mallado tipo hexaédrico [14, 15].

2.4. Simulación por ordenador del ensayo de vuelco de un vehículo como método de homologación equivalente

El ensayo de vuelco de un autobús es un proceso muy rápido y dinámico con etapas diferenciadas, por lo que se debería tener en cuenta a la hora de planificar el ensayo. El autobús basculará sin balancearse y sin efectos dinámicos hasta que alcance el equilibrio inestable y comience el vuelco, como se especifica en la Figura 4 [8].

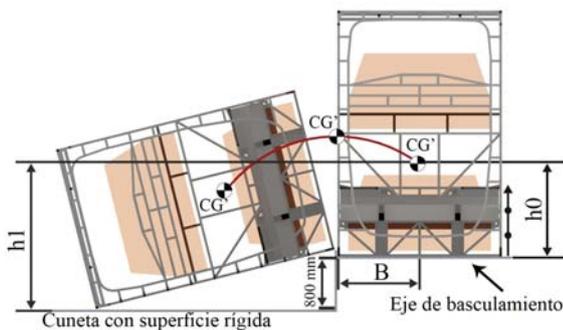


Figura 4. Especificación del ensayo de vuelco de un vehículo en la plataforma en posición inicial

Para la simulación por ordenador del ensayo de vuelco de la estructura de un autobús de dos pisos, se aplica el Anexo 9 de la Reglamentación 66 de la UN/ECE mediante el método de elementos finitos. Los valores matemáticos ingresados en el *software* para la simulación de vuelco, es la velocidad de giro del autobús con respecto a un eje ubicado en la plataforma basculante y la gravedad, esto con vistas a simular el movimiento de la estructura con respecto a la plataforma.

En la ecuación (1) se encuentra el valor de la velocidad angular obtenida a ser aplicada.

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \Delta h}{I}} = 3,3953 \text{ rad/s}^2 \quad (1)$$

En donde:

m = masa (kg)

g = constante gravitacional (m/s^2)

Δh = variación de altura (m)

I = Inercia rotacional ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

Para la simulación se definen los contactos entre la superficie maestra y un conjunto de nodos esclavos. La superficie maestra está definida por medio de los elementos rígidos usados para establecer la superficie en la que impacta la estructura del autobús, Figura 5.



Figura 5. Autobús en posición de primer contacto sobre la superficie rígida de impacto

2.5. Simulación por ordenador de impacto frontal

Las estadísticas de accidentes de tránsito demuestran que casi dos terceras partes de las colisiones son frontales, y la mitad de ellas presenta una cobertura entre el 30 y el 50 % de la superficie frontal [16]. Para comprobar los efectos de este tipo de colisión se realizan pruebas de simulación computacional, según el Reglamento 29 de la UN/ECE [8].

Los ensayos de impacto frontal de vehículos contra objetos fijos mediante simulación computacional, permiten ver el comportamiento del vehículo durante una colisión, además de ser un método barato, comparado con una prueba real de *Crash Test* [10], [17], [18].

El impacto frontal se lo analiza a 64 km/h, el autobús impacta frontalmente contra una barrera fija centrada (Figura 6). Este impacto pretende simular el tipo más frecuente de colisiones en las carreteras que resultan en lesiones graves o mortales, ya que la mayoría de los choques frontales en los autobuses de dos pisos involucra directamente a la cabina de los operadores [19].

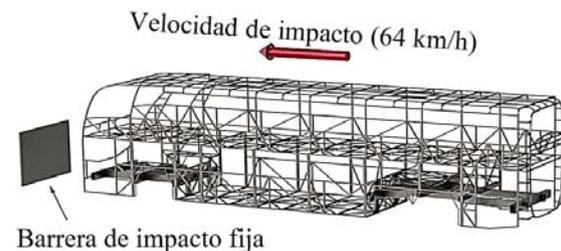


Figura 6. Especificación de la simulación de impacto frontal del autobús

Es importante indicar que la velocidad permitida para este tipo de vehículos en carreteras rectas es de 90 km/h, según la Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador, situación que es tratada en otras investigaciones que analizan el impacto frontal de un autobús de un solo piso [20].

3. Resultados y discusión

3.1. Volcamiento del autobús

La aplicación del ensayo de vuelco de la estructura del autobús de dos pisos mediante el método de elementos finitos funciona hasta que la estructura alcance la deformación máxima en el instante $t = 0,621s$ al impactarse con la superficie rígida.

3.1.1. Energías

La obtención de la altura de los centros de gravedad durante el volcamiento, como se muestra en la Tabla 3, se utiliza para encontrar la diferencia entre alturas del centro de gravedad (Δh), ecuación (3), la misma que es una variable de la ecuación de la energía total (E_T), ecuación 2, que absorberá la superestructura del autobús en el ensayo de volcamiento.

Tabla 3. Centros de gravedad

Parámetro	Valor
Punto de inestabilidad (H)	2284,8 mm
Punto de contacto (HC)	632 mm

$$E_T = 0,75 \cdot m \cdot g \cdot \Delta h \tag{2}$$

$$\Delta h = H - HC \tag{3}$$

$$E_T = 4,42 \times 10^7 J$$

La energía total absorbida por el autobús aplicando las ecuaciones del Reglamento 66 es de $4,42 \times 10^7 J$, y el valor máximo de la energía total obtenido en la simulación, Figura 7, es de $4,56 \times 10^7 J$. Al efectuar la comparación de la energía total calculada y la obtenida mediante la simulación existe una variación del 3,32 %, debido a que el centro de gravedad no es exacto, ya que no se considera en el proceso de modelado todos los componentes mecánicos y de acabado como son vidrios, asientos, forrajes, etc. Aunque exista esta variación en los valores obtenidos entre el cálculo efectuado y la simulación planteada se puede considerar que son coherentes y aceptables.

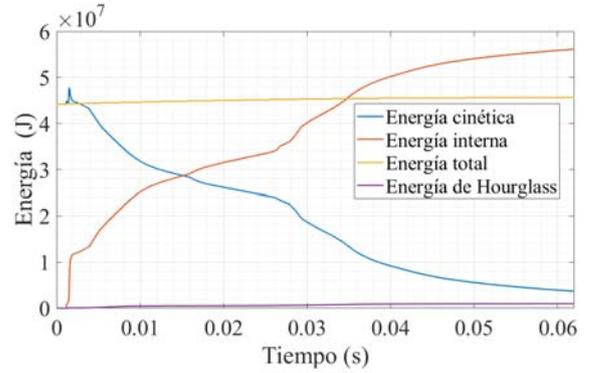


Figura 7. Energías obtenidas de la simulación en el ensayo de volcamiento del autobús

El valor máximo de la energía de Hourglass, durante el ensayo de volcamiento es de $0,0966 \times 10^7 J$, que representa el 2 % de la energía total. De acuerdo con el Anexo 9 de la Reglamentación 66, para que la simulación sea aceptada este valor no deberá exceder el 5 %, por lo tanto, se cumple con lo requerido en la respectiva reglamentación.

3.1.2. Espacios de supervivencia

La estructura del autobús al momento de alcanzar la deformación máxima durante el ensayo no cumple la Reglamentación 66, donde menciona que durante el volcamiento en ningún momento debe invadir el espacio de supervivencia o viceversa.

En la Figura 8 se observa el desplazamiento de la estructura con respecto al espacio de supervivencia. La planta baja de la estructura no se ve afectada por la deformación de la estructura, ya que es lo suficientemente rígida para soportar una colisión por vuelco; sin embargo, el espacio de supervivencia en la plata alta es invadido por la estructura en 48 mm, esto al alcanzar la deformación máxima durante el volcamiento; de esta manera, no cumple con lo requerido en el Reglamento 66 de la UN/ECE.

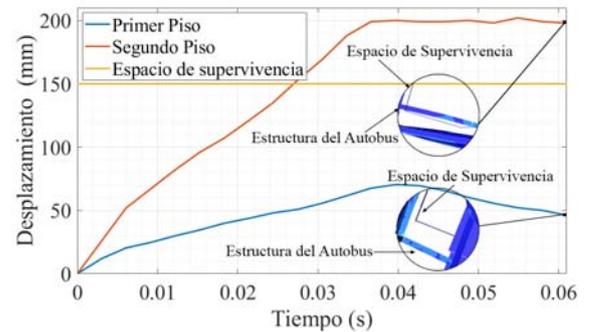


Figura 8. Desplazamiento de la estructura del autobús de dos pisos con respecto a la estructura

3.1.3. Velocidad

La velocidad del autobús es alta hasta que impacta sobre la superficie rígida, a partir de este instante la velocidad disminuye de manera progresiva (Figura 9); sin embargo, el intervalo de mayor importancia es cuando el autobús se impacta sobre la superficie, de tal manera lo que nos interesa es el contacto de las dos superficies durante el ensayo de volcamiento; el valor de la velocidad no disminuye hasta cero, debido a que la simulación de vuelco se efectúa hasta la deformación máxima de la estructura del autobús de acuerdo con la reglamentación.

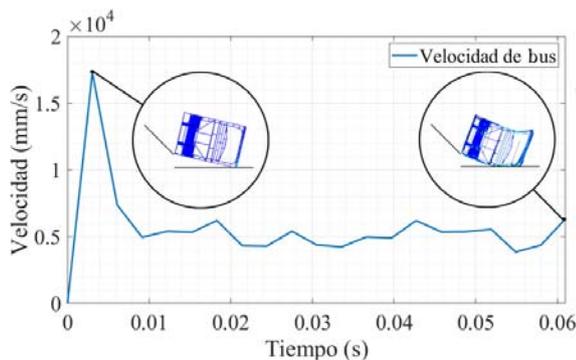


Figura 9. Comportamiento de la velocidad durante el ensayo del vuelco del autobús

3.2. Impacto frontal

La velocidad de autobús previa a una colisión viene dada por el cambio de velocidad (ΔV) que el vehículo experimenta y por la rapidez con la que se produce este cambio, es decir, la desaceleración, que está en función de la masa y la rigidez de los objetos que colisionan entre sí.

La zona de impacto del autobús con la barrera cubre todo el ancho de vehículo, por lo tanto, el bastidor del autobús en el impacto frontal absorbe la mayor parte de la energía cinética durante la colisión, además, se ajustó el modelo matemático para aplicar las mismas condiciones que se dan en un ensayo real físico.

3.2.1. Energías

La energía total máxima generada en la simulación del impacto frontal del autobús es de $4,56 \times 10^8$ J, se mantiene constante, es decir, es la misma antes y después de la colisión, lo cual indica que la energía producida en la colisión se disipa por medio de la deformación, más conocido como la energía interna (Figura 10).

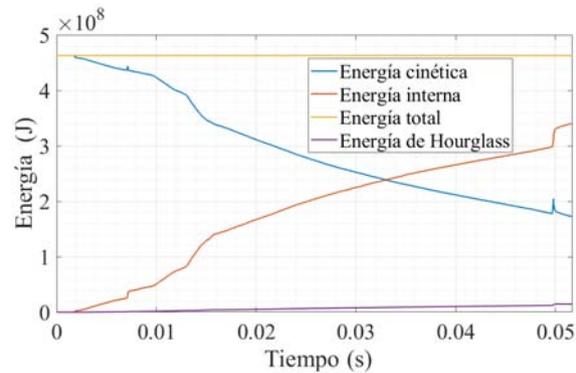


Figura 10. Energías de la simulación en el impacto frontal del autobús

Durante el impacto del autobús, el valor máximo alcanzado de la energía de Hourglass es de $0,106 \times 10^8$ J (Figura 11), que representa el 2,3 % de la energía total; de esta manera, cumple con lo requerido en la normativa en la que indica que no debe sobrepasar el 5 % de la energía total.

3.2.2. Deformación

La cabina del conductor alcanza una deformación de 250 mm, como se puede observar en la Figura 11, debido al impacto con la pared. Los perfiles de la estructura con mayor deformación son aquellos que impactan de manera directa con la superficie, además, las alas del chasis cumplen un trabajo de barra antiempotramiento, lo que impide que la cabina del conductor se deforme de manera excesiva, pero esto no impide que restos de la estructura puedan dañar la integridad de los controladores de la unidad de transporte.

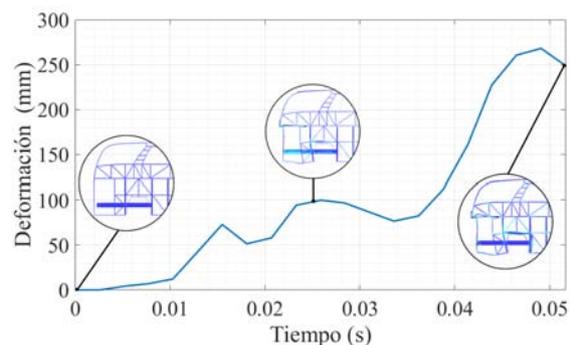


Figura 11. Deformación del autobús durante el impacto frontal sobre la superficie fija

3.2.3. Velocidad

El autobús comienza con una velocidad de 17 800 mm/s (64 km/h), a partir de ahí disminuye de manera constante por el impacto en la barrera fija; de esta manera, la cabina del conductor se deforma en

un pequeño lapso de tiempo hasta llegar a un estado de reposo; las partes más afectadas son los perfiles que impactan de manera directa sobre la superficie (Figura 12).

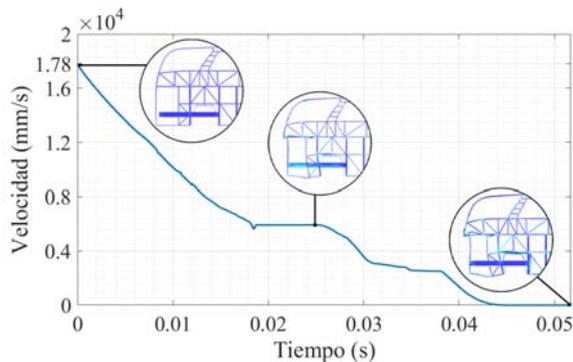


Figura 12. Comportamiento de la velocidad durante la simulación de impacto frontal del autobús

4. Conclusiones

En el estudio se estableció dos procesos de simulación computacional para el volcamiento lateral e impacto frontal de un autobús de dos pisos, fundamentado en la normativa R66 Y R29 de la UN/ECE [8] y la normativa NTE INEN 1323:2009 [9], de esta manera, se puede estimar la resistencia de la superestructura del vehículo durante una colisión, de igual manera ver el comportamiento de la estructura con respecto al espacio de supervivencia y los modos de deformación del vehículo.

El análisis de las colisiones nos permite evaluar el comportamiento elastoplástico del acero que conforma la estructura del autobús de dos pisos, utilizada en el transporte de pasajeros interprovincial, mediante la simulación computacional basada en dinámica explícita.

La parte superior de la estructura se vio afectada durante el volcamiento, ya que se obtuvo una deformación la cual genera una invasión del espacio de supervivencia de 48 mm; esto se puede observar en la Figura 8.

En el valor de la energía total obtenido en la simulación de volcamiento y el calculado mediante las fórmulas sugeridas por el Reglamento 66 UN/ECE [8], existe un error porcentual del 3,32 %, debido a que el centro de gravedad no es exacto. Es importante indicar que este error numérico se considera bajo, por lo tanto, los resultados obtenidos del volcamiento del autobús son válidos.

Las fuerzas generadas por el impacto frontal de la estructura del autobús sobre una superficie fija producen altas deformaciones especialmente en la cabina del conductor llegando a valores de 250 mm, en un periodo de tiempo muy pequeño, esto debido a que

las partes más críticas son los perfiles que reciben el impacto de manera directa. La superestructura del autobús es uno de los principales componentes de seguridad pasiva en estos vehículos, por lo cual la optimización de diseño es esencial para minimizar los daños que puedan causar a los pasajeros y operarios de la unidad de transporte.

La parte frontal de las estructuras de autobuses generalmente no cuentan con ningún sistema de protección para salvaguardar la vida de los ocupantes de la cabina durante un impacto frontal. Estos elementos dispuestos en la estructura de la carrocería no alcanzan a disipar la energía cinética en su totalidad, situación que debería ser considerada en procesos de diseño de estos elementos.

Referencias

- [1] B. Arenas Ramírez, F. Espinoza Molina, A. Arenas, E. Donnet, and F. Aparicio Izquierdo, "Metodología de estudio de accidentes de transporte colectivo de personas en países con carencia de información de calidad," in *XIV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (XIV CIBIM)*, 2019, pp. 1–10. [Online]. Available: <https://bit.ly/3CUEqDo>
- [2] United Nations. (2021) Objective 11: Make cities more inclusive, safe, resilient and sustainable. United Nations. Sustainable Development Objectives. [Online]. Available: <https://bit.ly/3nPicP8>
- [3] N. Çolak, U. Şahin, A. Candaş, and C. İmrak, "Desing and analysis of the protective structure of an intercity bus during a rollover accident," *Trans Motauto World*, vol. 3, pp. 62–65, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3re5dIK>
- [4] W. T. Gardner, *Evaluation of occupant protection in buses*. RONA Kinetics and Associates Ltd., 2002. [Online]. Available: <https://bit.ly/30XY3xo>
- [5] ENNOMOTIVE. (2019) Choque de vehículos: ¿Cómo se absorbe la energía mecánica? [Online]. Available: <https://bit.ly/3CMviko>
- [6] B. D. Palacios, "Análisis mediante el MEF de la protección de los conductores en autobuses," 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3HVFFWU>
- [7] UN/ECE, *Regulation No 29 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants of the cabin of a commercial vehicle*. Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE). [Online]. Available: <https://bit.ly/3FOFJ96>

- [8] —, *Regulation No. 66 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) – Uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure*. Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE), 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3r7Y391>
- [9] INEN, *NTE INEN 1323. Vehículos Automotores, Carrocerías de Buses, Requisitos*. Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/3oU82Mo>
- [10] E. Alcalá Fazio, F. Aparicio Izquierdo, R. Grimaldi Pastoril, and A. L. Martín López, “Aplicación de técnicas de ensayo virtual a ensayos de vuelco de superestructuras de autobuses y autocares.” in *Actas del IX Congreso de Ingeniería del Transporte, CIT 2010*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/314TIsy>
- [11] INEN, *NTE INEN 2656: Clasificación vehicular*. Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3lbTpDd>
- [12] A. García, M. Sánchez, E. Alcalá, and A. Carretero, “Diseño estructural de autobuses y autocares,” *DYNA-Automoción y Transporte*, vol. 73, no. 3, 1998.
- [13] O. C. Zienkiewicz, *El método de los elementos finitos*. Editorial Reverté, 1981. [Online]. Available: <https://bit.ly/3DWiVUf>
- [14] C. H. Arroba Arroba, M. A. Córdova Suárez, C. G. Santiana Espín, and C. O. G. E., “Simulación de vuelco con ANSYS y LS-DYNA de una superestructura de un autobús y su incidencia en el área de supervivencia,” *Ciencia Digital*, vol. 6, no. 4.2, pp. 86–99, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i4.2.1011>
- [15] G. Núñez Milán, “Simulación de un ensayo de vuelco de un autobús mediante LS-DYNA,” B.S. thesis, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3CUzK0A>
- [16] D. D. Illescas Pérez, “Simulación de un choque frontal de un vehículo automóvil contra diferentes tipos de barrera,” 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/3HZn77U>
- [17] E. Acar, B. Yilmaz, M. A. Güler, and M. Altin, “Multi-fidelity crashworthiness optimization of a bus bumper system under frontal impact,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, no. 9, p. 493, Aug 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02572-3>
- [18] M. A. Güler, M. E. Cerit, S. K. Mert, and E. Acar, “Experimental and numerical study on the crashworthiness evaluation of an intercity coach under frontal impact conditions,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 234, no. 13, pp. 3026–3041. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0954407020927644>
- [19] Latin NCAP. (2021) Impacto frontal. Latin NCAO. Para autos más seguros. [Online]. Available: <https://bit.ly/2ZpTDPc>
- [20] D. Cárdenas, J. Escudero, S. Quizhpi, and M. Amaya Pinos, “Propuesta de diseño estructural para buses de carrocería interprovincial,” *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 11, pp. 42–52, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xtnjYr>



MEJORA DEL PROCESO DE MOLIENDA DE LACTOSA PARA UNA EMPRESA FABRICANTE DE PRODUCTOS LÁCTEOS

IMPROVEMENT OF THE LACTOSE GRINDING PROCESS FOR A COMPANY MANUFACTURING DAIRY PRODUCTS

Darío J. Pinguil Loja¹ , Víctor R. Lojano Pillco¹ ,
Nelson G. Jara Cobos^{1,*} , Fran Z. Reinoso Avecillas¹

Recibido: 08-09-2021, Recibido tras revisión: 30-11-2021, Aceptado: 11-03-2022, Publicado: 01-07-2022

Resumen

Esta investigación presenta resultados obtenidos luego de haber implementado una mejora en el proceso de molienda de lactosa de una empresa fabricante de productos lácteos. Se determinó la situación actual del proceso, identificando que, en un tiempo de molido de 48 horas continuas, se obtiene un tamaño de partícula de lactosa de 40,23 μm . Posterior a los procesos de investigación teórica y experimental se estableció que con el uso de un molino de tambor con un volumen de elementos molientes del 25 %, una velocidad de operación de 61 rpm y el uso de cylpebs especificados en este trabajo, representan la mejor opción para obtener una molienda fina con un tamaño promedio de partículas de 22 μm en un tiempo de molido de 5 horas continuas, lo que genera principalmente un ahorro por materia prima (lactosa), consumo energético y tiempo de operación del proceso de molido.

Palabras clave: lactosa, tamaño de partícula, análisis granulométrico, distribución de cylpebs

Abstract

This research presents results obtained after having implemented an improvement in the lactose grinding process of a company which manufactures dairy products, the current situation of the process was determined identifying that in a continuous 48-hour grinding time, lactose particle size of 40.23 μm . is obtained. After theoretical and experimental developed research process, it was obtained a fine grinding with a particle size of 22 μm average in a grinding time of 5 continuous hours as the best option, using a drum mills with a volume of 25% grinding elements and 61 rpm operating speed, when using cylpebs which are specified in this research which generates savings in raw material (lactose), energy consumption and operation time of the grinding process.

Keywords: Lactose, particle size, granulometric analysis, cylpebs distribution

^{1,*}Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación, Optimización y Toma de Decisiones GID - STD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: njara@ups.edu.ec .

Forma sugerida de citación: Pinguil Loja, D. J.; Lojano Pillco, V.R.; Jara Cobos, N. G. y Reinoso Avecillas, F. Z. "Mejora del proceso de molienda de lactosa para una empresa fabricante de productos lácteos," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 28, pp. 71-79, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.07>.

1. Introducción

Las políticas de calidad y el mercado global en general exigen a las industrias que produzcan productos con mejor calidad, es decir, el mercado se vuelve más competitivo, haciendo la tarea más difícil para muchas industrias que quieren mantenerse en el mercado y, sobre todo, para tratar de abrir nuevos nichos.

Para este proyecto se establece una propuesta de mejora del proceso de molienda de lactosa, utilizada como materia prima para la producción de leche condensada; en este sentido, se ha buscado cumplir netamente con la reducción del tamaño de partícula a fin de conseguir una mejor consistencia en el producto final.

En la etapa inicial se determina los resultados de la situación actual de los parámetros del proceso de molienda establecidos como el tiempo de operación, velocidad de molienda, volumen de materia prima (lactosa) y tamaño de partícula. Esto con el fin de fijar las metas requeridas para cumplir con la obtención de un tamaño promedio de partícula de 25 μm , característica exigida para elaborar la leche condensada en la empresa. Luego de esto se realizó un análisis experimental para determinar el mejor tipo de molino que permita la reducción del tamaño de partículas y la disminución del tiempo de molido.

Mediante el proceso de medición microscópica se determina el tamaño de partícula mejorado.

Los resultados obtenidos comprueban que el tamaño de partícula de la lactosa como materia prima mejora de manera sustancial la calidad en la textura de la leche condensada como uno de los productos lácteos que emplea esta materia prima.

El trabajo de análisis, propuestas de mejora, desarrollo experimental y mediciones se encuentra de manera ampliada en el informe final del trabajo de Lojano Pillco *et al.* [1].

1.1. Parámetros que influyen en el proceso de molienda

Existe una serie de parámetros que influyen en el proceso de molienda de lactosa [2], a continuación, se presentan algunos de ellos:

- Velocidad crítica
- Relación entre los elementos variables de los molinos
- Tamaño de los elementos molidores
- Volumen de carga
- Distribución de material moliente
- Potencia
- Tipos de molienda

1.1.1. La velocidad crítica

Es aquella que ocurre cuando la fuerza centrífuga anula la influencia que la gravedad opera sobre las bolas. La siguiente relación determina esta velocidad crítica se muestra en la ecuación (1) [3].

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \text{ Sistema métrico} \quad (1)$$

Donde:

- V_c = Velocidad crítica en rpm
- D = Diámetro del molino (m)

1.1.2. La velocidad de operación del molino

Debe ser menor a la velocidad crítica, situándose un rango de operación de los molinos de bolas o cylpebs entre 65 % y 80 % de V_c [4]. En la Figura 1 se observa el movimiento del molino con sus efectos de cascada y catarata respectivamente.

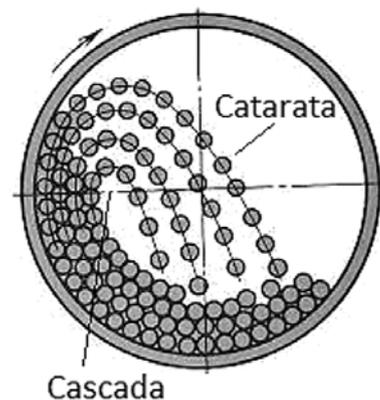


Figura 1. Movimiento de la carga de un molino de bolas [5]

Para el cálculo de la velocidad de operación se presenta la ecuación (2) [5].

$$V_{op} = V_c \times \%V_c \quad (2)$$

Donde:

- V_{op} = Velocidad de operación
- V_c = Velocidad crítica en rpm
- $\%V_c$ = Porcentaje de la velocidad crítica

1.1.3. La relación entre los elementos variables de los molinos

Considera variables de molienda como la velocidad crítica, el diámetro interno del molino y los cuerpos molidores [2].

1.1.4. El tamaño máximo de los elementos moledores

No debe presentar un mismo tamaño, sino que a partir del diámetro máximo se realiza una distribución de elementos moledores, pero a tamaños inferiores. El tamaño máximo de los elementos moledores se obtiene de la distribución porcentual y las respectivas medidas de los componentes para obtener una efectiva molienda.

1.1.5. La carga de los cuerpos moledores

Hace referencia a que los molinos no trabajan totalmente llenos. El volumen ocupado por los elementos moledores y el material a moler referido al total del volumen del cilindro del molino son lo que se denomina la carga de los cuerpos moledores la cual se calcula con la ecuación (3) [2].

$$B = V_m \times b \times 0,6 \times \delta_b \quad (3)$$

Donde:

- B = Peso de los cuerpos moledores [kg]
- b = constante (0,2 – 0,4)
- V_m = Volumen del material en dm^3
- δ_b = densidad de las cylpebs 7,8 kg/dm^3
- D = diámetro interno del cilindro molino
- L = longitud interna del molino

Habitualmente el grado de llenado en la elaboración de la molienda para lactosa utilizando cylpebs, comprende una carga del 25 al 33 % del volumen total y lo forman cuerpos moledores y material a moler [3].

1.1.6. La distribución de tamaño del material moliente bolas o cylpebs

Se puede determinar por diversos métodos, de los cuales en esta investigación se usó dos de ellos:

Método 1. En función del diámetro

Una vez conocida la carga inicial del material moliente se procede a sumar los diámetros de las bolas que piensa usarse. La sumatoria corresponde al 100 %. Seguidamente, se determina el porcentaje que corresponde al valor de cada diámetro. El resultado que se obtenga corresponde al porcentaje en peso, de la carga inicial, que corresponde a cada tamaño de cylpebs.

Método 2. En función al diámetro con la fórmula de Bond

Conocido la carga inicial del material moliente y el tamaño máximo de las mismas, se procede a determinar el porcentaje de distribución que corresponde a cada tamaño de bola, empleando: $Y = 100(X/B)^{3/2}$

se lleva al gráfico y se determina el porcentaje en peso que corresponde a cada tamaño comercial de cylpebs que se debe alimentar.

En cuanto a la distribución porcentual de los medios de molienda en función del diámetro, se aplica la fórmula de Bond de la ecuación (4) [6].

$$y = 100 \left(\frac{x}{B} \right)^m \quad (4)$$

Donde:

- y = % peso de medios de molienda de diámetro inferior a x
- B = diámetro máximo de bola [in] o [mm]
- x = diámetro bola a distribuir [in] o [mm]
- m = constante, sus valores son:
(3,2 para molinos de barras o cylpebs)
(3,84 para molinos de bolas)

1.2. Lactosa

La lactosa se presenta como partículas o polvo cristalino de color blanco. Tradicionalmente se utilizan en la elaboración de comprimidos y se considera un azúcar de gran importancia en las industrias de elaboración de alimentos. Excelente excipiente de pastillas y píldoras entre muchas otras aplicaciones.

La solubilidad de la lactosa es diez veces menor que de la sacarosa, si a ello le sumamos los azúcares agregados, el problema inmediato será evitar la saturación de la solución, ya que llegándose al límite de saturación, el exceso de azúcares precipitará en forma de cristales formando grumos, defecto físico que comúnmente se presenta en los dulces comerciales [7]. En este sentido, al emplear una lactosa con tamaño de partícula alrededor de 30 μm , resulta muy conveniente para mejorar la calidad de productos lácteos como la leche condensada.

1.3. Métodos de medición del tamaño de partícula

En este proyecto se utilizó el método de análisis granulométrico por tamizado y el de visualización microscópica.

1.3.1. Análisis granulométrico por tamizado

Es una de las técnicas más antiguas de clasificación de polvos mediante tamiz. Se encuentra entre las técnicas más empleadas y menos costosas para la determinación de la distribución del tamaño de partícula en un amplio rango de tamaños, desde poco más de 100 μm hasta aproximadamente 20 μm [8] (Figura 2).



Figura 2. Tamiz y proceso de tamizado

Un análisis granulométrico completo consiste en hacer pasar un material generalmente 100 gramos representativos de la muestra original, por una serie de tamices comenzando por un menor número de mallas y concluyendo con el de mayor número.

En la Tabla 1 se presenta la designación del tamiz de acuerdo con lo que se establece en la norma ASTM E-11.

Tabla 1. Designación de tamiz ASTM y aberturas de apertura nominal correspondientes [9]

ASTM Sieve Designation					
Aperture Opening	Designation	Aperture Opening	Designation	Aperture Opening	Designation
125 mm	5.00 in.	9.50 mm	3/8 in.	425 µm	No. 40
106 mm	4.24 in.	8.00 mm	5/16 in.	355 µm	No. 45
100 mm	4 in.	6.70 mm	0.265 in.	300 µm	No. 50
90 mm	3 1/2 in.	6.30 mm	1/4 in.	250 µm	No. 60
75 mm	3 in.	5.60 mm	No. 3 1/2	212 µm	No. 70
63 mm	2 1/2 in.	4.75 mm	No. 4	180 µm	No. 80
53 mm	2.12 in.	4.00 mm	No. 5	150 µm	No. 100
50 mm	2 in.	3.35 mm	No. 6	125 µm	No. 120
45 mm	1 3/4 in.	2.80 mm	No. 7	106 µm	No. 140
37 mm	1 1/2 in.	2.36 mm	No. 8	90 µm	No. 170
31.5 mm	1 1/4 in.	2.00 mm	No. 10	75 µm	No. 200
26.5 mm	1.06 in.	1.70 mm	No. 12	63 µm	No. 230
25 mm	1 in.	1.40 mm	No. 14	53 µm	No. 270
22 mm	7/8 in.	1.18 mm	No. 16	45 µm	No. 325
19 mm	3/4 in.	1.00 mm	No. 18	38 µm	No. 400
16 mm	5/8 in.	850 µm	No. 20	32 µm	No. 450
13.2 mm	0.53 in.	710 µm	No. 25	25 µm	No. 500
12.5 mm	1/2 in.	600 µm	No. 30	20 µm	No. 635
11.2 mm	7/16 in.	500 µm	No. 35		

1.3.2. El análisis por microscopía

Es una técnica que permite visualizar rápidamente el tamaño y forma nominal de las partículas en una muestra y obtener una micrografía representativa de la región analizada; además, consigue por ampliación detalles de la forma y de la superficie de las partículas [1] (Figura 3).

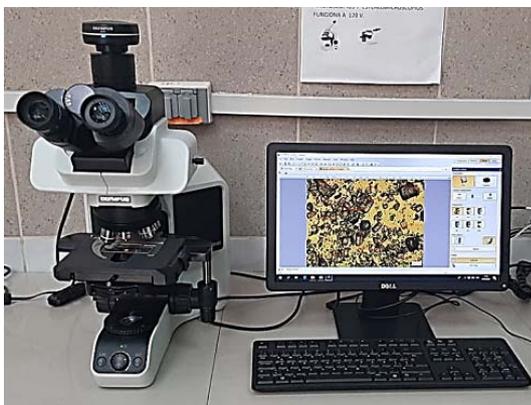


Figura 3. Microscopio OLYMPUS BX43

2. Materiales y métodos

Para la investigación se realizó en primera instancia el levantamiento de la situación actual del proceso de molido de lactosa desarrollado en la empresa fabricante de productos lácteos y se establecieron las variables fundamentales del proceso como la velocidad, distribución del material moliente y tiempo de molienda. Para saber el tamaño de partícula actual se sometieron las muestras en tamices y microscopía, con toda esta información se elaboró la propuesta de mejora con los parámetros de operación óptimos para el proceso de molienda de lactosa.

2.1. Descripción del equipo de molienda de lactosa actual

Se usa un molino giratorio horizontal de 20 cm de diámetro y 30 cm de longitud, con una capacidad de 2 kg, potencia de 1 hp y 61,7 rpm de velocidad rotacional; emplea arandelas de acero inoxidable como elementos molientes (ver Figura 4).

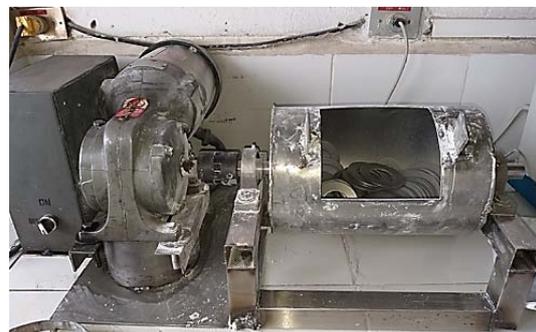


Figura 4. Molino horizontal giratorio

3. Parámetros de operación

En la Tabla 2 se presentan los parámetros utilizados para el proceso de molienda de lactosa.

Tabla 2. Condiciones de operación

Condiciones de operación	
Tiempo de molienda [h]	48
Peso lactosa [kg]	2,5
Peso Tricalcium Phosphate [g]	100
Velocidad [rpm]	61
Material moliente	arandelas

Al respecto de las arandelas empleadas para el proceso de molido, estas se colocan en un volumen del 12 % aproximadamente, en una cantidad de 40 unidades, cuya distribución se la realiza en función

del diámetro interno y externo de las mismas (Figura 5 y Tabla 3).



Figura 5. Material moliente – Arandelas de acero inoxidable

Tabla 3. Distribución de tamaños de arandelas

Diám. Int. (mm)	Diám. Ext. (mm)	Peso (kg)	Cant.
42	75	2,9322	37
22	50	0,1585	2
13	38	0,07925	1
TOTAL		3,17	40

Como se ha venido mencionando el material a moler es la lactosa y le proporciona el dulce a la leche. Este producto se comercializa en sacos de 50 kg. (ver Figura 6), por lo general, viene con una granulometría inicial de 150 μm , valor determinado por el fabricante.



Figura 6. Lactosa: saco y muestra

Con la intención de verificar el tamaño de partícula establecido en la materia prima, se procedió con la determinación de la distribución del tamaño de partícula, para lo cual se usó el método de tamizado y se consideró una cantidad de muestra de 100 g y un tiempo de agitación de 30 min [10].

Una vez que se realizó dicho procedimiento [11], los resultados previos del proceso de tamizado se ven en la Figura 7, en donde la curva de % pasante acumulado que representa el porcentaje de muestra con su tamaño equivalente y el % retenido acumulado que representa el porcentaje de material que tiene un tamaño (x) mayor.

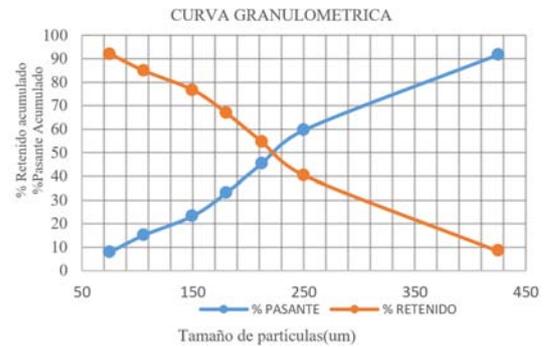


Figura 7. Porcentaje pasante acumulado y retenido acumulado vs. tamaño de partícula

Con lo determinado y haciendo estimaciones promedio de los tamaños de partículas, de acuerdo con la distribución en los tamices y relacionando con el tamaño de la malla en μm y la fracción retenida en peso, se presenta los valores para estimar el promedio característico de la distribución de los tamaños de grano de lactosa en un valor de 241 μm (Tabla 4). Este valor difiere con el tamaño certificado de partícula de lactosa de 150 μm , estableciéndose la necesidad de optar por otro procedimiento de medición del tamaño de partícula.

El análisis microscópico permitió visualizar rápidamente el tamaño y forma nominal de las partículas en una muestra y obtener una micrografía representativa de la región analizada; además, por ampliación se consigue detalles de la forma y de la superficie de partículas [1].

Con el procedimiento mencionado y un aumento de 4x se puede observar que las partículas de lactosa tienen características de forma heterogénea y aleatoria con distintas medidas (Figura 8).

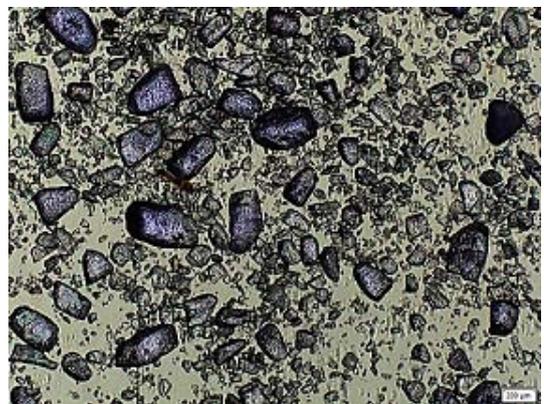


Figura 8. Partículas de lactosa antes de moler

3.1. Tamaño de partícula obtenido – proceso de molienda de lactosa actual

Una vez que se sometió la lactosa al proceso actual de molienda, se procedió a obtener la microfotografía de

una muestra, a fin de determinar el tamaño promedio y forma de la partícula resultante (Figura 9).

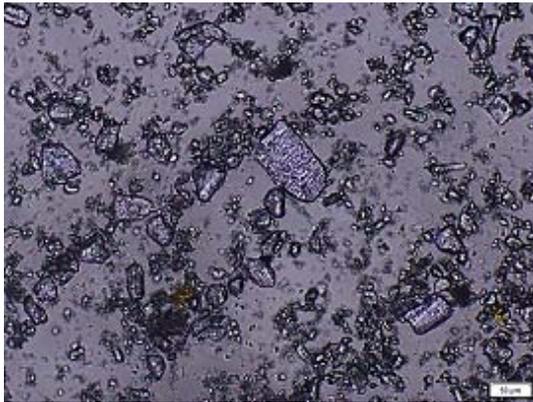


Figura 9. Partículas de lactosa en 48 h de molienda

Al realizar 30 mediciones se obtuvo un tamaño mínimo de partícula de 19,99 μm , un tamaño máximo de 108,67 μm , lo que resultó en un promedio de 40,23 μm y una desviación estándar de 17,24 μm . En este sentido, se ha podido determinar que el proceso actual reduce el tamaño de partícula, sin embargo, por la heterogeneidad de tamaños de partículas y por el elevado número de horas de molido (lo que provoca que la lactosa se pegue en los elementos molientes), esta materia prima resulta inadecuada para obtener leche condensada con la consistencia requerida por la empresa.

3.2. Alternativas de mejora

De acuerdo con las investigaciones, se consideran los siguientes parámetros para la selección del tipo de molino:

- Tamaño de grano a obtener
- Tiempo de molienda
- Tipo de molienda
- Potencia requerida
- Costo

Luego de hacer un análisis de ponderación de los parámetros aplicados a los cuatro tipos de molinos que pueden ser empleados para el proceso de molienda de lactosa: molino planetario, molino attritor, molino de tambor y molino de alta energía; resultó como la mejor opción el molino de tambor, el cual alcanzó el valor más alto de ponderación (ver Tabla 4). Por lo tanto, para el desarrollo del presente proyecto de mejora se utilizó el molino giratorio horizontal de tambor, para determinar fundamentalmente el tiempo, velocidad y distribución de tamaños de material moliente óptimos.

Tabla 4. Ponderación de resultados – selección de mejor alternativa

Tipo de molino	Costo	Ponderación				Total
		Potencia requerida	Tiempo molienda	Tamaño grano	Tipo de molienda	
Planetario	3	3	5	5	1	17
Attritor	3	3	3	3	5	17
Tambor	5	3	3	3	5	19
Alta energía	1	1	5	5	1	13

3.3. Ensayos experimentales de molienda

Para el proceso de mejora, se tomaron en cuenta tres parámetros de molienda: distribución de tamaño de material moliente, tiempo de molienda y velocidad, para esto se realizó pruebas preliminares con dos diferentes tipos de material moliente: bolas y cylpebs.

Llenado. El llenado óptimo de los molinos se determina de acuerdo con la ecuación (5) y en función de la Figura 10 [1].

$$h = 0,16D \quad (5)$$

Donde:

- h = distancia desde el eje central del tambor
- D = diámetro interno del tambor

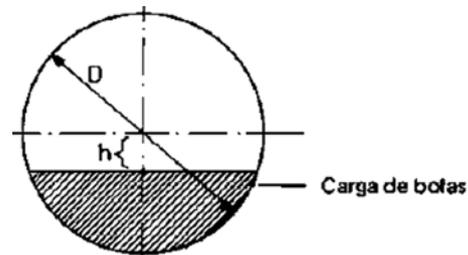


Figura 10. Llenado de material moliente [1]

Velocidad crítica. Luego de realizar los cálculos correspondientes se determina una velocidad crítica de 94,5 rpm, por lo que al considerar que la velocidad de operación debe estar en un rango del 65 al 80 %, lo que corresponde a 61,425 rpm y 75,6 rpm.

Material moliente. Para los ensayos se utilizaron dos tipos de materiales molientes, bolas y cylpebs, con características dimensionales, de peso y de distribución de tamaño establecidas en las Tablas 5 y 6; manteniendo constante para los dos casos un grado de llenado del 25 % y una velocidad de 61,4 rpm.

Tabla 5. Distribución de tamaño de bolas

Diámetros (in)	% peso	Peso (kg)	Peso unidad (kg)	Número bolas
1 ¼	55,55	3,57	0,132	27
1	44,44	2,85	0,0671	42
2 ¼	100%	6,43		69

Tabla 6. Distribución de tamaño de cylpebs

Diám. (mm)	Long. (mm)	% de peso	Peso (kg)	Peso unidad (kg)	Cant.
1 ½	29,28	26,66	1,82	0,262	7
1 ¼	29,19	22,22	1,52	0,183	8
1	22,44	17,77	1,21	0,089	14
¾	23,01	13,33	0,91	0,051	18
05-ago	18,18	11,11	0,76	0,028	27
½	19,15	8,88	0,6	0,02	30
45/8		100%	6,85		104

4. Resultados y discusión

En la Tabla 7 se presenta los resultados de los cinco ensayos con diferentes tiempos de molienda empleando bolas como elementos molientes; la medición de los tamaños de partículas se realizó por la técnica de microscopía en el cual se tomó tres muestras de cada ensayo realizado, así mismo, se realizaron treinta mediciones para cada muestra, dando como resultado los tamaños máximos y mínimos de las partículas de lactosa.

En los distintos ensayos desarrollados, se observó también que a mayor tiempo de molienda se presentan mayores pérdidas del producto, debido fundamentalmente a la aglomeración de la lactosa en las paredes del molino y en los cuerpos molientes por el incremento de la temperatura de operación [1].

Tabla 7. Resultados obtenidos con material moliente tipo bolas

Perdidas (g)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (um)	
		Máximo	Mínimo
100	1	102,6	26,45
110	2	96,89	19,85
119	3	85,42	17,25
150	4	60,07	12,08
200	5	59,04	6,82

El ensayo se realizó con 1050 gramos de lactosa y 100 gramos de tricalcium phosphate, a un tiempo mínimo una hora de molienda, ya que a ese tiempo se empezó a notar la reducción del tamaño de partícula del producto y se estableció como tiempo máximo de cinco horas, porque a este tiempo se comenzó a notar una mayor aglomeración del producto en las paredes del molino y en los cuerpos moledores; de esa manera, se obtuvo una buena reducción de tamaño de

partícula de acuerdo con las imágenes de microscopía (ver Figuras 11 y 12).

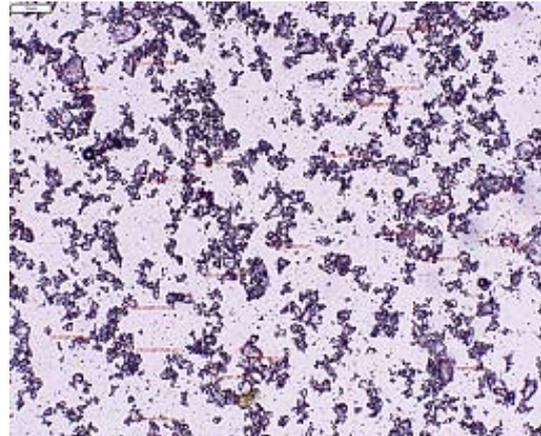


Figura 11. Partículas de lactosa molidas 1 h – escala 100 µm

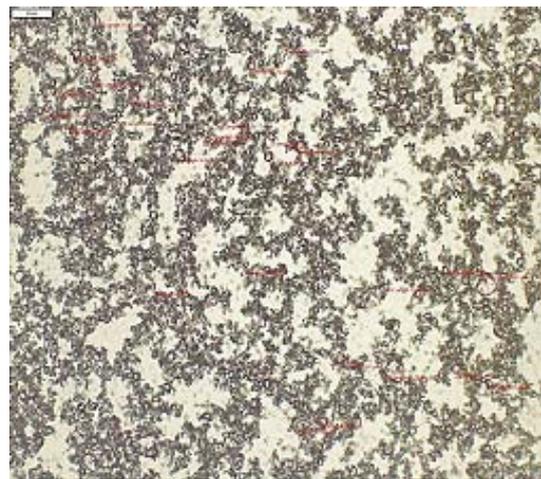


Figura 12. Partículas de lactosa molidas 5 h – escala 50 µm

En la Tabla 8 se presenta los resultados de los cinco ensayos realizados a diferentes tiempos de molienda, utilizando de igual manera 1050 gramos de lactosa y 100 gramos de tricalcium phosphate; la medición de los tamaños de partículas se realiza por la técnica de microscopía en el cual se efectúa treinta mediciones para cada muestra.

Tabla 8. Resultados obtenido con material moliente tipo cylpebs

Perdidas (g)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (um)	
		Máximo	Mínimo
80	1	100,85	15,56
120	2	92,62	12,23
132	3	78,45	10,81
290	4	65,48	9,89
359	5	54,29	5,78

En las Figuras 13 y 14 se observa una diferencia de los tamaños de partícula de lactosa, durante una y cinco horas de molienda, en donde se puede apreciar los tamaños de partícula de lactosa.

Uno de los factores que se establecen para el mejoramiento del proceso de molienda de lactosa, es el material moliente, en este caso se propone utilizar cylpebs (cilindros de acero inoxidable), debido a que esta forma tiene una mayor área de superficie para reducir el tamaño de partícula de lactosa mediante impacto, permitiendo obtener una mayor cantidad de partículas finas en menor tiempo.

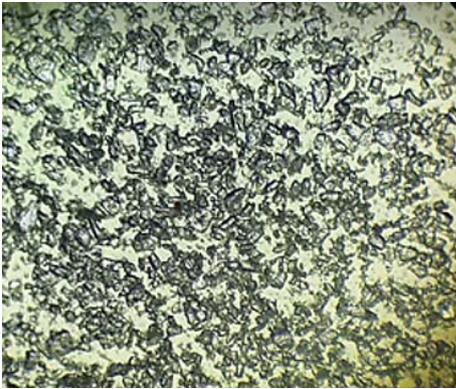


Figura 13. Partículas de lactosa molidas 1 h – Escala 100 μm

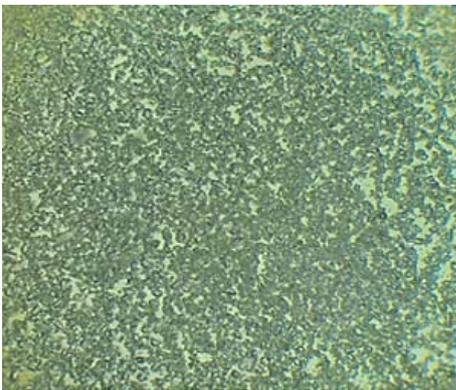


Figura 14. Partículas de lactosa molidas 5 h – escala 100 μm

Para que la molienda sea efectiva se debe controlar los parámetros de operación como el tiempo, velocidad y la distribución de tamaño de cylpebs. Estos parámetros mejorados se presentan en la Tabla 9, los cuales se comparan con los resultados de la situación actual de la empresa.

Tabla 9. Parámetros de operación mejorados

Parámetros						
% Vol. de carga	Velocidad [rpm]	Tiempo molienda [h]	Material moliente	Peso (kg)	Cant.	Tamaño [μm]
12	61	48	Arandelas	3,174	40	40,23
25	61	5	cylpebs	6,85	104	22

5. Conclusiones

Las variables identificadas que influyen en el proceso de molienda de lactosa son la distribución de tamaño de material moliente, los tiempos de molienda y la velocidad, las mismas que implican en el tamaño de grano de lactosa.

Mediante las pruebas de molienda efectuadas en el molino de tambor se logró determinar los parámetros de operación adecuados para el proceso de molido. En consecuencia, se seleccionó los cylpebs como material moliente más eficaz para el proceso de molienda en productos finos, con un tiempo de molienda efectivo de 5 horas.

La selección de los Cylpebs como elementos molientes, se debe a que presentan una mayor área de superficie para la rotura de las partículas de lactosa mediante impacto, resultando ser más efectivos, en menor tiempo con mayor cantidad de partículas finas, obteniéndose en un tiempo de molienda de 5 h un tamaño de grano de 22,075 μm .

Se optimizó la carga de lactosa aplicada a la molienda, ya que con menos horas de operación la materia prima no se pega en las paredes internas del tambor y en los cuerpos molientes, disminuyendo trascendentalmente las pérdidas.

Con el tamaño de partícula de 22 μm se pudo determinar de manera cualitativa (tacto) la mejora en la textura de la leche condensada, lo que significa para la empresa una mejora en la calidad del producto.

Referencias

- [1] V. R. Lojano Pillco, D. J. Pinguil Loja, and N. G. Jara Cobos, *Propuesta de mejora para el proceso de molienda de lactosa en empresas lácteas*. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. [Online]. Available: <https://bit.ly/3a4IusB>
- [2] A. O. Venegas Tomalá, *Diseño y construcción de un molino de bolas para aplicaciones de pulvimetalurgia en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato*. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. [Online]. Available: <https://bit.ly/3R0Ewlm>
- [3] J. R. Alcántara Valladares, *Diseño práctico de un molino de bolas*. Instituto Politécnico Nacional, México, vol. 7, no. 2. [Online]. Available: <https://bit.ly/3acXvIG>
- [4] O. A. Gutiérrez Gutiérrez, *Estudio para calibración de molinos*. Universidad de Chile, vol. 158. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bH0Ujm>

- [5] M. S. Altamirano Peralta and D. J. Sacoto Rivera, *Evaluación experimental del proceso de molienda de crudo de UCEM. Planta industrial Guapán*. Universidad del Azuay, Ecuador, vol. 1, no. 1. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xZFuPi>
- [6] G. A. Villablanca Robles, *Estudio de prefactibilidad para la construcción y operación de una minicentral hidroeléctrica (MCH) en la subcuenca del río Palora*, vol. 22. [Online]. Available: <https://bit.ly/3NxJFxx>
- [7] C. D. Char, *HACCP, Microbiología predictiva y factores en combinación para mejorar la calidad de productos lácteos: Dulce de leche: aplicación del concepto de factores en combinación y de la microbiología predictiva en el mejoramiento de la calidad del dulce de leche*. Universidad de Buenos Aires, Argentina. [Online]. Available: <https://bit.ly/3yy46qz>
- [8] R. C. Rowe, P. Sheskey, and M. Quinn, *Handbook of pharmaceutical excipients, Six Edition*. Pharmaceutical Press. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xZGIGw>
- [9] A. Jillavenkatesa, L.-S. H. Lum, and S. Dapkunas, “Nist recommended practice guide: Particle size characterization.” [Online]. Available: <https://doi.org/10.6028/NBS.SP.960-1>
- [10] E. J. Montes Montes and R. Torres Gallo, “Determinación de los factores de forma de área (α) y volumen (β), de cristales de α -lactosa utilizando microscopía óptica,” vol. 13, no. 2, pp. 17–24. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21897/rta.v13i2.666>
- [11] E. A. Luna Méndez and F. T. Valencia Guaricela, *Elaboración de guías prácticas de procesos metalúrgicos para el Laboratorio de Minas de la Universidad del Azuay*. Universidad del Azuay, Ecuador. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Ai7fw8>



MODELO MATEMÁTICO DE UN HORNO RESISTIVO PARA TERMOFORMADO DE LÁMINAS DE POLIPROPILENO

MATHEMATICAL MODEL OF A RESISTIVE OVEN FOR THERMOFORMING POLYPROPYLENE SHEETS

Lidia Castro-Cepeda^{1,*} , José Cortés-Llanganate^{1,2} 

Recibido: 03-05-2022, Recibido tras revisión: 06-06-2022, Aceptado: 13-06-2022, Publicado: 01-07-2022

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla un modelo matemático de un horno resistivo para la producción de planchas termoformadas, localizado en una planta de producción de la ciudad de Riobamba. El objetivo de la investigación es conseguir la estabilidad de la temperatura y que, al pasar por el proceso de termoformado, las planchas tengan una dimensión homogénea que garantice la satisfacción del cliente. Para ello se analizan las variables físicas que rigen los fenómenos de transferencia de calor; radiación, convección y conducción, y así obtener un modelo matemático que prediga el perfil de temperatura del horno en el proceso de termoformado, a partir del cual se diseña un controlador utilizando varias técnicas de control que se acoplen al sistema de forma eficiente. En la primera etapa de la investigación se plantea un estudio teórico de los fenómenos físicos y las ecuaciones matemáticas que los representan. Luego son resueltas a través de técnicas computacionales usando Simulink para conseguir el perfil de temperatura. Por último, se valida este modelo comparándolo con aquellos ya obtenidos en trabajos anteriores a través de técnicas estadísticas; finalmente, se propone un nuevo controlador que garantice la variabilidad mínima de la temperatura. Como resultado de la simulación se consigue una variación de ± 1 mm del ancho de la plancha.

Palabras clave: modelado, polipropileno, temperatura, termoformado, transferencia de calor

Abstract

A mathematical model of a resistive oven for the production of thermoformed sheets is developed in this paper; such oven is located in a production plant in the city of Riobamba. The objective of the research is to achieve temperature stability and that the plates have a homogeneous dimension when going through the thermoforming process, to guarantee customer satisfaction. For this purpose, the physical variables that govern the heat transfer phenomena, namely radiation, convection and conduction, are analyzed, to obtain a mathematical model that predicts the temperature profile of the oven in the thermoforming process, from which a controller is designed using various control techniques that are efficiently coupled to the system. A theoretical study of the physical phenomena and of the mathematical equations that represent them is proposed in the first stage of the research. Then, they are solved through computational techniques using Simulink to obtain the temperature profile. Finally, this model is validated by comparing it with those obtained in previous works through statistical techniques, and a new controller that guarantees minimum temperature variability is proposed. As a result of the simulation, a variation of ± 1 mm in the width of the plate is achieved.

Keywords: heat transfer, modelling, polypropylene, temperature, thermoforming

^{1,*}Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Ecuador. Autor para correspondencia ✉: lidia.castro@esPOCH.edu.ec.

²Jefe de Planta Prefabricados Riobamba, Unión Cementera Nacional UCEM S.A - Ecuador.

Forma sugerida de citación: Castro-Cepeda, L. y Cortés-Llanganate, J. "Modelo matemático de un horno resistivo para termoformado de láminas de polipropileno", *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 28, pp. 80-91, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.08>.

1. Introducción

La industria del plástico a nivel mundial ha crecido a través de los últimos años. Además de los datos de producción de materia prima virgen, esto se evidencia en el porcentaje de plástico que se recicla actualmente en los distintos países del mundo. En diez años el plástico tuvo un incremento del 80 % en el tema de reciclaje en los países europeos [1].

En Ecuador el plástico se utiliza en varios campos de producción, como son: la industria alimenticia (empaques de bebidas, *snacks*, etc.), industria de la construcción (techos traslúcidos, tejas plásticas, cortinas, etc.), utensilios de cocina en general [2]. Específicamente en la ciudad de Riobamba se encuentra localizada una industria, que se dedica a la fabricación de láminas traslúcidas de polipropileno, que sirven de complemento para los techos de fibrocemento.

La planta posee tres líneas de producción que han sido montadas con tecnología reciclada, proveniente de países como España; después de que ya han cumplido su ciclo de vida útil se adquieren a precios menores para su reutilización. Luego en industrias locales, se repotencia haciendo algunas adecuaciones e incluso mecanizando partes y piezas que se acoplen al sistema para que funcionen con la mayor eficiencia posible. El proceso para la transformación del polipropileno se resume en la Figura 1.

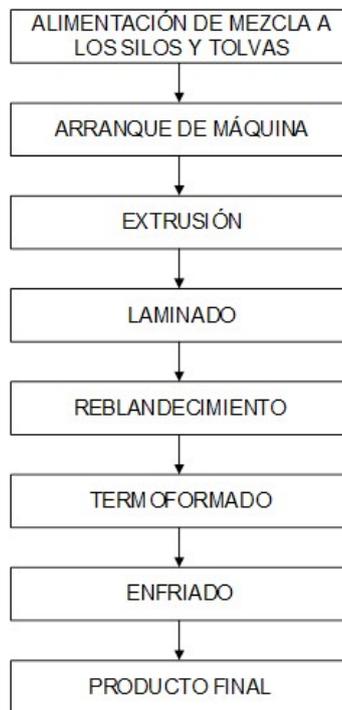


Figura 1. Proceso de transformación del polipropileno

La máquina principal de esta línea es la que produce láminas de polipropileno tipo P7, lo cual se realiza en una termoformadora. El presente trabajo de investigación se ha desarrollado sobre el horno de entrada de

la mencionada máquina termoformadora de plástico. Para controlar y mejorar la producción del horno de termoformado existen trabajos previos.

El primer trabajo consistió en establecer un sistema SCADA para el control de temperatura. Este se basaba en un sistema de control por histéresis, en donde las resistencias de la máquina en general se encendían y luego se apagaban cuando llegaban al valor deseado de temperatura [3]. Hoy en día el sistema descrito está en uso para la zona de extrusión, distribución y hornos de salida. En la Figura 2 se muestra la arquitectura de red utilizada en el sistema SCADA.

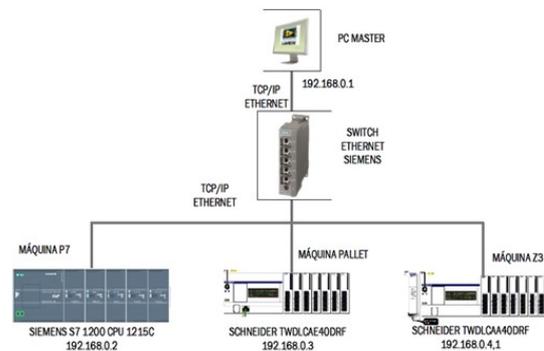


Figura 2. Arquitectura de red de área local de las máquinas [3]

El segundo trabajo consistió en el diseño de un controlador para el horno de entrada basado en la identificación de sistemas. Con ello se obtuvo la función de transferencia del horno. Una vez identificada dicha función, se calculó un controlador PI para su control [4]. Este sistema es el que, actualmente, está siendo usado en la planta de producción para controlar el horno de entrada.

El sistema, hasta el momento, no ha sido modelado matemáticamente, por lo que se desconoce el comportamiento real de sus variables. Por lo tanto, se ha visto necesario encontrar este modelo matemático, el cual será comparado con los modelos existentes. Basándose en ellos se sugerirán modificaciones en el controlador que mejoren la calidad del producto. Hoy en día el producto cumple la normativa vigente del país, pero se observa que no es completamente uniforme en cuanto a su ancho. Al apilarlo para su distribución y venta genera al comprador una sensación y percepción que las planchas no cumplen con la normativa, por la variabilidad de dimensiones. Por lo tanto, el principal problema de este horno es que produce planchas con un ancho muy variable y que ocasiona que ciertos clientes no acepten el producto.

De las investigaciones analizadas, [5–8] Neacă y otros utilizan los fenómenos de transferencia de calor, para cuantificar la temperatura a través del modelo matemático encontrado, que para este caso de estudio, es similar. Sin embargo, cada publicación se distingue,

pues todo su sistema está conforme a las características particulares de cada horno. Throne [9], [10], en cambio, basa su estudio en dos variables: la absorptividad y emisividad, haciendo hincapié que son fundamentales en el desarrollo del modelo. Siguiendo la recomendación de este autor, se usará los datos adecuados en el análisis de la radiación, que se detallan en el planteamiento de la solución.

Mientras que Khan [11], Erdogan [12] y Chy [13], incluyen en sus trabajos investigativos propiedades específicas como densidad, difusividad térmica, espesor, calor específico y conductividad térmica, datos que también serán considerados en el desarrollo de esta investigación, para el análisis de conducción y convección, considerando la accesibilidad que se tiene al equipo y las características que se detallan en la descripción de la estructura del horno.

Por otra parte, Schmidt [14] y Ajersch [15] utilizan sensores infrarrojos, por lo que su estudio está direccionado al análisis por radiación. Estas publicaciones obtienen resultados que se ajustan a la realidad, sin embargo, por las condiciones experimentales del horno en estudio no es posible replicar esta técnica. Aunque servirá para comparar y discutir los resultados al final de la investigación. Chy y Boulet [16] dividen en capas el material a ser calentado, y luego interpretan los resultados como un solo elemento a través de técnicas numéricas, condición que no es posible realizarla en este estudio, pero servirá para contrastar dichos resultados al momento de realizar las conclusiones.

Aunque todos estos investigadores desarrollaron modelos matemáticos aceptables del horno, en especial para la fase de calentamiento, aún existen algunas discrepancias entre la simulación, los resultados experimentales y las variables que cada autor utiliza en sus investigaciones, además que dichos modelos matemáticos se ajustan a las características propias de cada horno.

Por lo tanto, esta investigación pretende desarrollar un modelo mejorado para el horno, objeto de estudio y que se ajuste a sus características. Teniendo en cuenta de que el proceso se ejecuta principalmente a través de la intuición del operador de la máquina y su experiencia a través de prueba y error. Por ello nace la iniciativa de comprender el proceso de calentamiento del horno, haciendo especial énfasis en las características propias de su construcción, sabiendo que es un horno fabricado empíricamente. Con este modelo matemático se busca establecer una forma más precisa para predecir el perfil de temperatura dentro del horno que se usará en el futuro para un mejor control del proceso.

Existe un estudio previo realizado sobre el horno en análisis. En 2017, Cortés realiza la implementación de un sistema de control de temperatura para el horno de termoformado de la máquina denominada P7. Describe brevemente al horno mencionando que «está constituido por placas metálicas, las mismas que forman

una cámara. Dicha cámara posee un aislamiento de lana de vidrio para reducir la irradiación del calor al exterior. En su interior se ubican resistencias tipo S y tipo U, conocidas así por la forma de las mismas, que son de distinta potencia eléctrica» [3]. El autor obtiene el modelo del horno mediante técnicas gráficas de identificación de sistemas, esto como un paso previo al diseño del controlador respectivo. Aplica varias técnicas, comparándolas entre sí. Al finalizar la validación respectiva, elige la que obtiene mayor porcentaje con el 90,95 %, que corresponde al método gráfico analítico sin retardo.

Sobre el modelo obtenido mediante identificación de sistemas, Cortés [4] obtuvo mediante los cálculos respectivos un controlador del sistema, que dio resultados aceptables con respecto a la variabilidad de la temperatura. Sin embargo, aún existe el inconveniente en el ancho de las planchas. El propósito de obtener el modelo matemático del horno en mención parece simple, pero llevarlo a la práctica resulta mucho más complejo, pues depende en gran medida de los datos con los que se cuenta. Con el fin de proporcionar un modelo del sistema que muestre el comportamiento dinámico real del horno y, de esta manera, permita realizar el cálculo de diversos controladores que finalmente optimicen su funcionamiento.

2. Materiales y métodos

La metodología para desarrollar este trabajo de investigación se resume en el diagrama de la Figura 3 que se muestra a continuación:

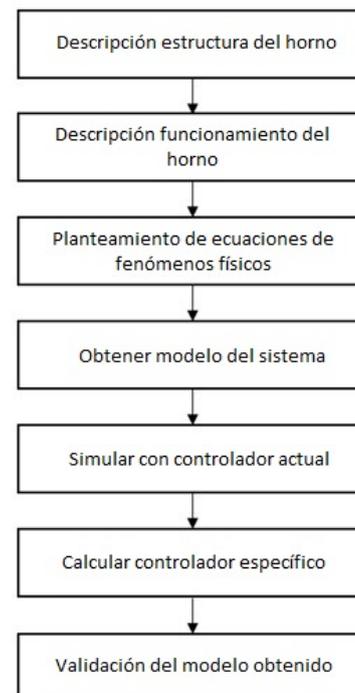


Figura 3. Metodología de trabajo

2.1. Descripción de la estructura del horno

El horno en estudio, que se muestra en la Figura 4, es de construcción local, con resistencias eléctricas óhmicas que por efecto Joule se calientan y ceden su calor. Ha sido construido con elementos, piezas de máquinas y equipos reciclados, que se acoplan entre sí para solventar las necesidades del proceso productivo. Para este caso específico, la producción industrial de planchas termoformadas usadas a nivel nacional en diversas aplicaciones. El horno está constituido por placas metálicas. Tiene forma de paralelepípedo, compuesto por dos cajas, una interior y otra exterior fabricada con láminas de acero galvanizado de 2 mm. Dichas cajas se encuentran separadas 5 cm una respecto a la otra. Entre placa se encuentra colocado el aislamiento. Para este diseño se usa fibra de vidrio, fabricada a partir de una mezcla de arenas, boratos y silicatos, cumpliendo así los parámetros recomendados por varios autores mencionados en el estado del arte. Por este motivo, de ahora en adelante, se supondrá que el horno posee el aislamiento necesario que evita pérdidas significativas que modifiquen el perfil de temperatura de este horno.



Figura 4. Horno de termofomado máquina P7

2.2. Descripción de los fenómenos físicos del horno

Para tomar medidas en el funcionamiento real de horno estudiado, se colocaron dos termocuplas tipo J, con el fin de medir la temperatura en el centro del horno y en una pared lateral, cada segundo durante el tiempo necesario en el que se llega a una estabilidad aproximadamente en 5000 segundos. Datos que se almacenaron en un computador conectado al equipo y que se usarán para obtener el modelo matemático, gracias a que el horno posee un sistema de adquisición de datos incorporado. Para que el estudio del horno sea más sencillo y práctico se ha dividido su funcionamiento en tres etapas las cuales se detallan en la Figura 5.



Figura 5. Diagrama de funcionamiento del horno

En la Tabla 1 se muestra las nomenclaturas a utilizarse en las diferentes secciones del presente artículo.

Tabla 1. Nomenclatura utilizada en las diferentes ecuaciones

Abreviatura	Significado
$i(t)$	Corriente eléctrica que circula por el conductor.
$u(t)$	Voltaje al que está conectada la resistencia eléctrica.
$R(T)$	Resistencia del cable conductor dependiente de la temperatura.
ρ	Resistividad de la resistencia dependiendo de la temperatura.
L	Longitud del cable de resistencia.
A	Área de la sección del conductor.
$p(t)$	Potencia eléctrica.
\dot{Q}_{alm}	Flujo térmico almacenado en la resistencia.
\dot{Q}_{rad}	Flujo térmico de calor por radiación.
\dot{Q}_{conv}	Flujo térmico de calor por convección.
m	Masa.
$C_c(T)$	Calor específico del conductor en función de la temperatura.
ΔT_w	Calentamiento de la resistencia (diferencia de temperaturas).
T_0	Temperatura inicial (temperatura ambiente del lugar, inicialmente $T_w = T_0$).
ε	Constante de emisividad.
C_n	Constante de Stefan-Boltzmann.
S_w	Superficie del cable del que está hecha la resistencia.
T_1	Temperatura interior de la superficie del horno.
T_w	Temperatura del cable.
α	Coefficiente de convección del aire dentro de la resistencia.
T_a	Temperatura del aire dentro del horno.
$\dot{Q}_{conv\ t-a}$	Flujo térmico total producido por las resistencias en el aire.
$\dot{Q}_{conv\ a-p}$	Flujo térmico producido por el aire en la pared.
$\dot{Q}_{alm\ a}$	Flujo térmico almacenado en el aire.
$a_p(T)$	Coefficiente de convección del aire y la pared del horno en función de la temperatura.
S_p	Superficie interna de las paredes del horno.
m_{a1}	Masa del aire del interior del horno.
$c_a(T)$	Calor específico del aire en función de la temperatura.
T_a	Temperatura del aire del interior del horno sin carga.
$\dot{Q}_{cond\ ext}$	Flujo térmico transferido al exterior por conducción.
$\dot{Q}_{alm\ aisl}$	Flujo térmico almacenado en el aislamiento.
k	Conductividad térmica del material.
A	Área a través de la cual fluye el calor.
ΔX	Espesor del aislamiento.
ΔT	Diferencia de temperaturas.
P	Densidad.
V	Volumen.
y_{modelo}	Valores que se obtienen del modelo.
$y_{observado}$	Valores tomados observados de la experimentación.
N	Número de datos.

2.2.1. Cálculo de flujo térmico en la resistencia

Se inicia con la transformación de energía eléctrica en energía térmica en la resistencia. Se parte fundamentalmente de la ecuación básica de la ley de Ohm (1).

$$u(t) = i(t) * R(T) \quad (1)$$

El único elemento que interviene en el horno para transformar la energía es la resistencia, cuyos cálculos son fundamentales, pues al ser construida manualmente se desconoce. Para esto se usa la ecuación (2) en la que interviene la resistividad que depende de la temperatura, la longitud y la sección de la resistencia, datos que se pueden obtener fácilmente a través de mediciones, tablas y conociendo el material del que está construida.

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (2)$$

Se aplica la ley de conservación de la energía en la termodinámica, que afirma que la cantidad de calor que recibe el sistema se transforma y realiza un trabajo en contra de fuerzas externas, como se muestra en la ecuación (3).

$$p(t) = \dot{Q}_{alm} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv} \quad (3)$$

El flujo térmico almacenado en la resistencia se expresa mediante la expresión (4).

$$\dot{Q}_{alm} = \frac{d(Q_{alm})}{dt} = \frac{d(m * C_C(T) * \Delta T_w)}{dt} \quad (4)$$

El calentamiento por radiación que se verifica en la ecuación (5).

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon * C_n * S_w * (T_w^4 - T_1^4) = K_1 * (T_w^4 - T_1^4) \quad (5)$$

2.2.2. Cálculo de flujo térmico en el aire

Después de realizar los cálculos respectivos con la resistencia, se continúa con las ecuaciones para el aire dentro del horno, con el fin de ir relacionado los fenómenos de transferencia de calor y desarrollar el modelo matemático esperado. Se parte de la ecuación en la que se relaciona el flujo térmico producido por la resistencia y el flujo térmico por el aire en la pared, dando como resultado el flujo térmico total, como se presenta en la ecuación (6).

$$\dot{Q}_{conv\ t-a} = \dot{Q}_{conv\ a-p} + \dot{Q}_{alm\ a} \quad (6)$$

El flujo térmico producido por el aire en la pared se expresa, usando nuevamente el fenómeno de convección. Posteriormente se calcula el flujo térmico almacenado en el aire que se expresa en (7).

$$\dot{Q}_{alm\ a} = \frac{d}{dt}(Q_{alm\ a}) = \frac{d}{dt}(m_{a1}c_a(T)(T_a - T_0)) \quad (7)$$

2.2.3. Cálculo de flujo térmico en el aislante

Concluido el estudio de la transferencia de calor en el aire, se procede al análisis en el aislamiento. Para ello se utiliza la ecuación (8) en la que se define que el flujo de calor en la pared por el movimiento del aire, que es igual a la suma del flujo térmico transferido al exterior por conducción y el calor almacenado en el aislamiento mismo.

$$\dot{Q}_{conv\ a-p} = Q_{conducciónext} + Q_{alm\ aisl} \quad (8)$$

El horno posee una pared de aislamiento cuyo material es fibra de vidrio, por lo tanto, es necesario cuantificarlo, y para ello se usa el fenómeno de la conducción térmica. Se ha explicado, de manera general, las expresiones matemáticas y las definiciones que se utilizarán en la solución del modelo matemático; en el siguiente apartado se detallan los cálculos más importantes que alimentarán al sistema.

2.3. Planteamiento de la solución

Después de detallar los fenómenos físicos apoyados en la teoría clásica que se presentan durante el calentamiento del horno para el proceso productivo de termoformado, se procede con los cálculos matemáticos con el fin de obtener las ecuaciones diferenciales que permitirán encontrar el modelo matemático esperado. Con el fin de implementar de manera computacional la solución al problema planteado se usa la herramienta matemática Simulink, ya que es un entorno de programación visual que funciona sobre Matlab.

Para iniciar con los cálculos de la resistencia se usan los datos de la hoja técnica del material. Para ello se realiza una búsqueda dentro de los catálogos de la empresa para verificar específicamente que se tome la información correcta proporcionada por la empresa proveedora. En este caso el conductor utilizado es Nikrothal 70 [17]. Se realizan los cálculos adecuados que conducen la ecuación (9).

$$T_w = \int \left(\frac{\left(\frac{u^2(t)}{R} - K_1 * (T_w^4 - T_1^4) - \alpha * S_w * (T_w - T_a) \right)}{m * C_c} \right) dt + T_0 \quad (9)$$

Esta ecuación se implementa en Simulink y visualiza el esquema de entradas y salidas en la Figura 6.

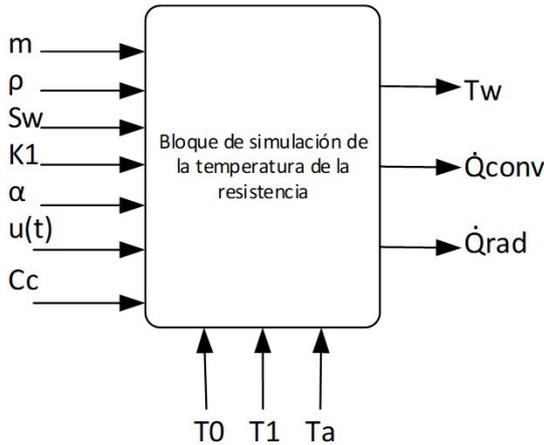


Figura 6. Esquema de entradas y salidas del cálculo de la temperatura de la resistencia

Se obtiene el comportamiento de la resistencia en función de la temperatura y con ello el calor que transforma a través de los fenómenos físicos ya descritos. Dicha implementación se puede observar en detalle en la Figura 7, que corresponde a la ecuación (9).

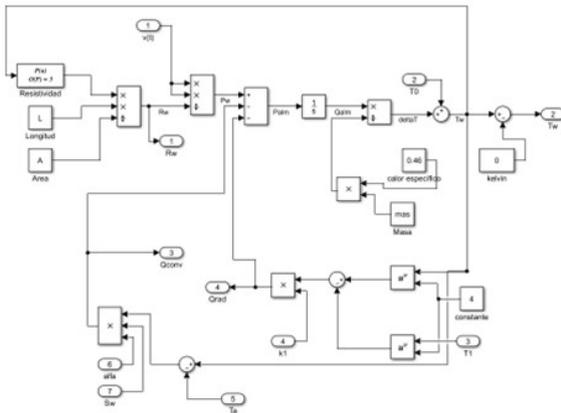


Figura 7. Esquema de entradas y salidas del cálculo de la temperatura de la resistencia

En la Figura 8 se observa la respuesta de la temperatura de la resistencia en función del tiempo al conectarla a un voltaje de 440 VCA, dicho perfil de temperatura se utilizará en el modelo del horno de termoformado.

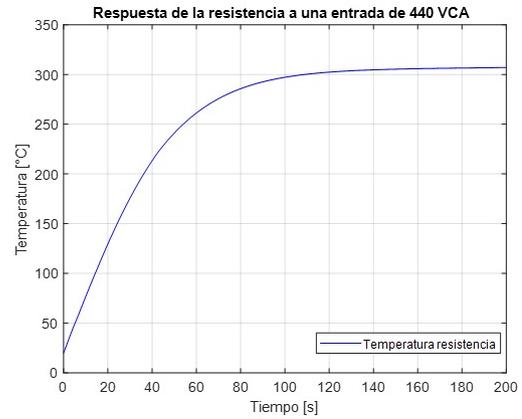


Figura 8. Temperatura de la resistencia a lo largo del tiempo

Finalmente, se calcula la temperatura del horno, dando lugar a la ecuación (10) que se implementa en Simulink. Dicha ecuación es el resultado de los cálculos matemáticos de las ecuaciones fundamentales de la termodinámica.

$$T_a = \frac{\int (\dot{Q}_{conv} t - a - a_p(T) S_p(T_a - T_1)) dt}{m_{a1} c_a(T)} + T_0 m_{a1} c_a(T) \quad (10)$$

En la Figura 9 se observa el esquema básico que describe las entradas del sistema implementado en Simulink de la ecuación (10).



Figura 9. Esquema de entradas y salidas del cálculo de la temperatura del aire dentro del horno

El cálculo de la temperatura en el aire dentro del horno, las ecuaciones y datos conseguidos a través de tablas y cálculos se implementan en Simulink. Este proceso se puede observar en detalle en la Figura 10, que corresponde a la ecuación (10).

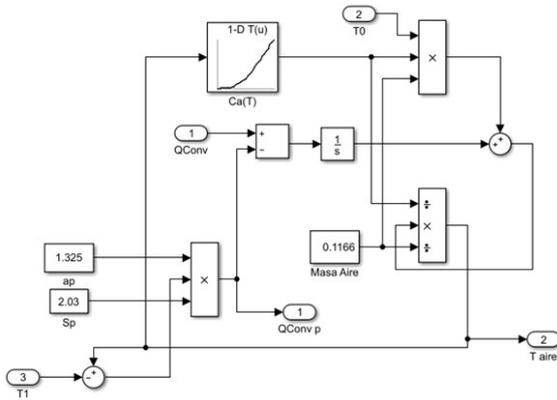


Figura 10. Implementación de ecuación (10)

Teniendo el cálculo del flujo térmico de la resistencia y del aire del horno, el siguiente paso es calcular la temperatura que se pierde en el aislamiento y con ello obtener la temperatura que tiene la pared del horno. Al relacionar todos los cálculos se obtiene la temperatura del aire, dato que interesa conocerlo para su posterior procesamiento en los cálculos de sistemas de control. En el caso de la temperatura de la pared se utilizan valores obtenidos mediante el sistema de adquisición de datos del horno. En la Figura 11 se observa la implementación total del cálculo de temperatura en el aire del horno. Para ello se emplean los bloques ya calculados en los pasos previos.

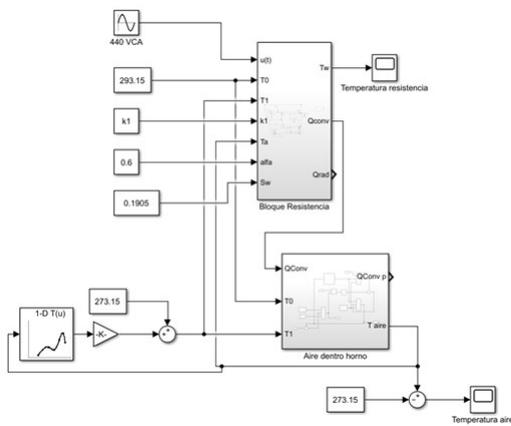


Figura 11. Implementación total del cálculo de temperatura en el aire del horno

En la Figura 12 se observa la respuesta del modelo matemático comparándolo con la respuesta del horno obtenido mediante la adquisición de datos. Como se aprecia, el modelo se ajusta bastante bien a la curva real de funcionamiento. Lo que hace predecir que la validación del modelo matemático será mejor que la validación del modelo obtenido mediante técnicas de identificación gráficas publicadas por Cortés [4].

Para la obtención de la Figura 12 se ha aplicado una entrada del tipo escalón tanto al sistema real como

al modelo matemático. En el sistema real se ha aplicado un voltaje de 440 VCA en las resistencias. En el modelo matemático de igual forma se ha aplicado un valor de 440 VCA. La adquisición de datos en el horno se lo realiza mediante la lectura de una termocupla tipo J, cuyo dato es muestreado en un periodo de un segundo.

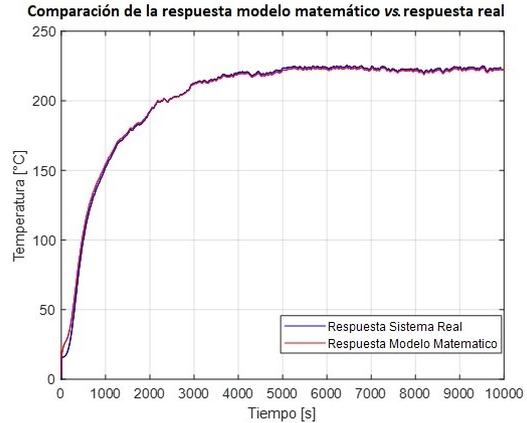


Figura 12. Comparación de la respuesta modelo matemático vs. respuesta real

3. Resultados y discusión

3.1. Validación del modelo obtenido

Para validar el modelo matemático obtenido se utiliza técnicas matemáticas que permiten cuantificarlo. Este apartado se realiza desde varios puntos de vista, como se explica a continuación:

3.1.1. Comparación de la raíz del error cuadrático medio del modelo matemático vs. modelo actual

La Figura 13 es similar a la Figura 12. Todas las curvas mostradas son las respuestas a una entrada del tipo escalón de 440 VCA. Se observa el comportamiento del sistema real en color azul, cuyos datos son tomados experimentalmente a través del sistema de adquisición de datos y han sido procesados en MATLAB. En color rojo se aprecia la respuesta del modelo matemático obtenido a través de los cálculos descritos en los apartados anteriores. La diferencia radica en que se muestra en color verde la respuesta a una entrada escalón 440 VCA aplicada al modelo por identificación gráfica que, actualmente, se utiliza en la planta para los cálculos del controlador. En esta gráfica se puede inferir que el modelo matemático se asemeja al perfil de temperatura real, por lo que se espera que al cuantificar el error este sea menor.

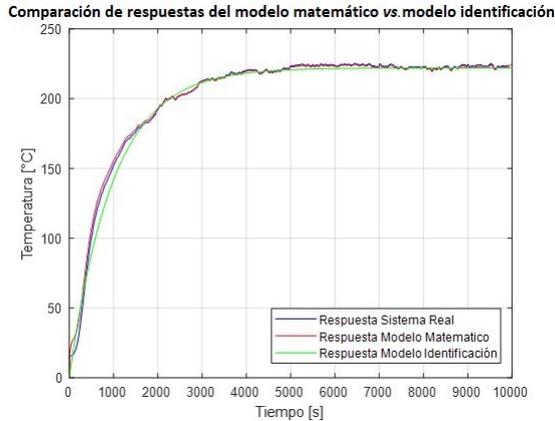


Figura 13. Comparación de las respuestas del modelo matemático vs. el modelo calculado por identificación gráfica

Para la primera validación se calcula la raíz cuadrada del error cuadrático medio RMSE [18], por sus siglas en inglés, cuya expresión matemática está representada por la ecuación (11).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{I=1}^N \frac{(y_{modelo} - y_{observado})^2}{N}} \quad (11)$$

Se calcula el valor de 2 RMSE de las respuestas a una entrada tipo escalón de 440 VCA:

- RMSE entre el modelo por identificación gráfica de sistemas que se usa actualmente para el cálculo del controlador y el sistema real cuyo resultado se representa en la ecuación (12).
- RMSE entre el modelo matemático encontrado en el presente trabajo de investigación y sistema real cuyo resultado se representa en la ecuación (13).

En el planteamiento de la solución se ha obtenido la curva que representa el modelo matemático real, pero es necesario compararla con los datos experimentales y, a su vez, con el modelo usado para el control actual en la máquina termoformadora.

$$RMSE_{modelo-actual} = 4,3354 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$RMSE_{modelo-matemático} = 2,3395 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (13)$$

De la comparación de los errores calculados se evidencia que el error del modelo matemático es menor que el del modelo actual, por lo tanto, el modelo matemático encontrado en este trabajo de investigación se ajusta con mayor precisión a la curva real del horno de termoformado.

3.1.2. Comparación de respuestas de control ante una entrada escalón

Se parte del sistema de control original que se visualiza en la Figura 14. Se introduce el modelo matemático en el sistema de control actual con el fin de analizar su respuesta, el valor del escalón (señal de entrada) es 140 °C.

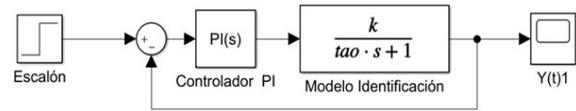


Figura 14. Sistema de control de temperatura utilizando el modelo de identificación

En la Figura 15 se observa la comparación de la respuesta del sistema de control con el modelo de identificación (línea azul) versus la respuesta del sistema de control con el modelo matemático (línea roja), y el escalón de 140 °C (línea negra). Se observa que las respuestas son diferentes a pesar de usar el mismo controlador, por lo que se puede interpretar que no es el adecuado para el modelo matemático, por lo tanto, se vuelve necesario hallar uno que se ajuste mejor a las características propias del modelo matemático, de esta forma, se espera que haya una mayor estabilidad en la temperatura y esto implícitamente conlleve a mejorar el producto terminado evitando los desajustes en el ancho de las planchas termoformadas.

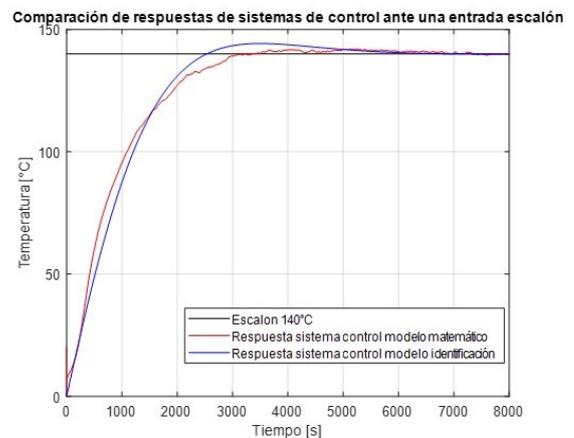


Figura 15. Comparación de respuestas de los sistemas de control

3.1.3. Cálculo de un nuevo controlador que se ajuste a las condiciones del modelo matemático, para simular y verificar su respuesta

Para calcular el nuevo controlador y simular la respuesta del sistema se aplica el método clásico de control de Ziegler-Nichols, pues es uno de los métodos más conocidos para la sintonización de los parámetros PID.

Sus reglas provienen de una respuesta experimental, según la dinámica del proceso y sin suponer algún conocimiento previo de la planta a controlar [19–21].

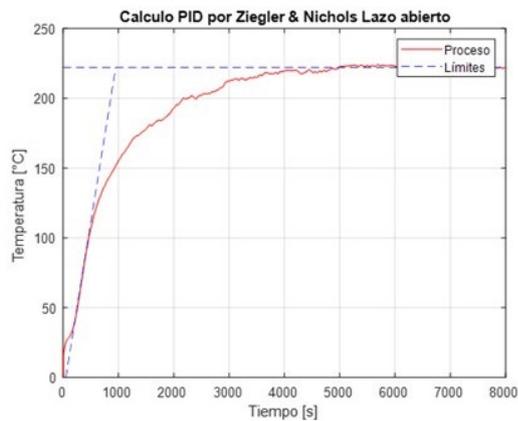


Figura 16. Cálculo PID por Z-N lazo abierto para modelo matemático

En la Figura 16 se observa los trazos de los límites que sirven para obtener los datos necesarios y, de esta forma, aplicar el método de Ziegler-Nichols de lazo abierto.

Como se observa en la Figura 17, la respuesta del controlador PID utilizando el método de Ziegler-Nichols de lazo abierto no presenta mejoras en comparación con el sistema actual. Esto se debe a que el tiempo de estabilización (tiempo para llegar al valor consigna de control) es alto y la variación de temperatura no disminuye. Debido a esto es necesario calcular el controlador PID por otro método.

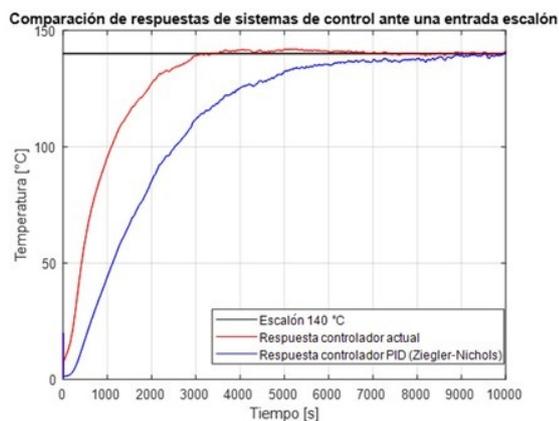


Figura 17. Comparación de la respuesta del controlador PID aplicado Z-N *vs.* controlador PI actual

La herramienta PID Tuner de Simulink proporciona un método de ajuste PID de lazo único rápido y de amplia aplicación para los bloques del controlador PID. Con este método, se puede ajustar los parámetros del controlador PID para lograr un diseño robusto con el tiempo de respuesta deseado.

En la Figura 18 se observa las respuestas del sistema de control, comparando el obtenido a través de la herramienta de Simulink PID Tuner en color azul con la respuesta del controlador actual en color rojo. Se verifica que este controlador genera una mejor respuesta del sistema llegando a una estabilidad de la temperatura en el menor tiempo posible, se ajusta mucho mejor dando una variabilidad de la temperatura menor. Hay que tomar en cuenta que los datos utilizados para el siguiente análisis son los que se encuentran a partir de los 4000 segundos, pues es ahí cuando el sistema se mantiene estable.

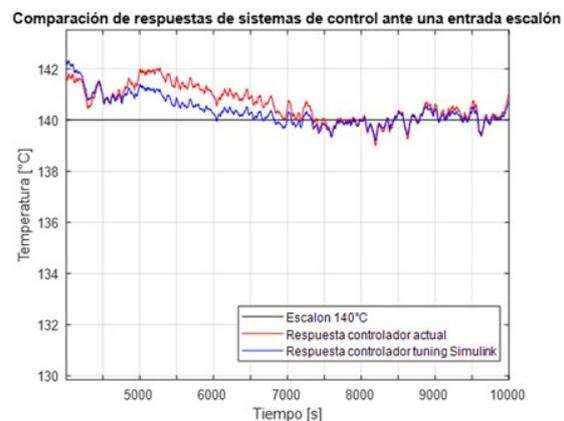


Figura 18. Visualización detallada de las respuestas de los sistemas de control actual *vs.* controlador tuning

A través de técnicas estadísticas se verifica el comportamiento de los datos para compararlos con los actuales y con ello cuantificar la mejora producida si se llegase a aplicar este controlador en el proceso productivo. La media de la temperatura del controlador actual es de 140,62 °C mientras que la media de la temperatura con el controlador propuesto en este trabajo es de 140,35 °C por lo que se evidencia cuantitativamente que se tiene una mayor estabilidad de la temperatura aplicando este controlador que usa el modelo matemático desarrollado. Además, se refleja en el error de la desviación estándar que para el controlador nuevo es menor. El 72,81 % de los datos simulados con el nuevo controlador son normales respecto a su media, mientras que tan solo el 65,55 % de los datos del controlador actual son normales respecto a su media; pero si comparamos los datos del controlador actual apenas el 54,41 % de los datos son normales. De esta forma, se identifica que el nuevo controlador proporciona mejores resultados al sistema, por lo que si se lo implementa se garantiza una mayor estabilidad de la temperatura.

Se realiza un análisis de regresión lineal con datos suministrados por el departamento de calidad, con lecturas de temperatura y el ancho de las planchas termoformadas, con el fin de obtener una ecuación y

verificar la correlación de la temperatura en función del ancho, donde A representa el ancho y T la temperatura del horno, como se muestra en (14). Con este modelo matemático se calcula el ancho de la plancha con las temperaturas que se obtienen del sistema con el controlador actual y se realiza el análisis estadístico correspondiente.

$$A = -1,20 + T + 1088,62 \quad (14)$$

En la Figura 19 se observa el histograma de las planchas medidas, y se tiene una variación de ± 2 mm, además, se nota claramente que los datos son bastante dispersos. Por lo que las planchas son heterogéneas en cuanto a su ancho y al momento de apilarlas da la sensación de incumplimiento de la norma.

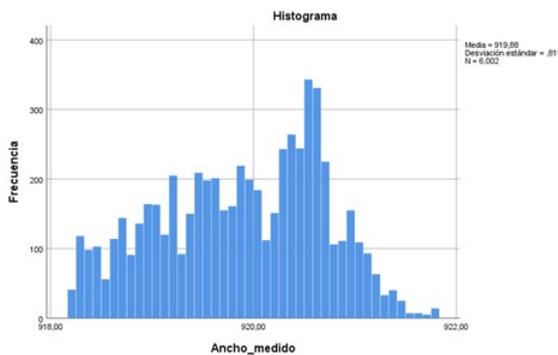


Figura 19. Histograma del ancho medido de las planchas termoformadas

Por otra parte, en la Figura 20 se muestra el histograma de las planchas calculadas con el modelo de regresión lineal usando el sistema con el controlador propuesto y se observa claramente que existe menos dispersión de datos y se tiene una variación de ± 1 mm, con lo que se supondría que al apilarlas se verá de manera homogénea, generando seguridad al cliente en cuanto a la calidad del producto. Aunque sería importante tener datos experimentales que corroboren los datos obtenidos en este trabajo de investigación.

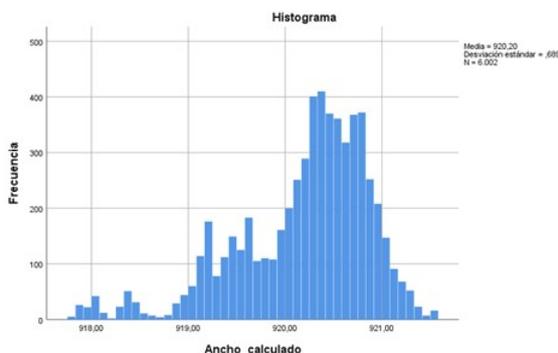


Figura 20. Histograma del ancho calculado de las planchas termoformadas

De esta forma, se valida el modelo matemático y, a su vez, el nuevo controlador propuesto que se espera sea aplicado en la planta de producción y tener acceso a esos datos para con ello se confirme la eficacia de lo que en este documento se ha detallado.

4. Conclusiones

Se obtuvo el modelo matemático del horno resistivo para la producción de láminas termoformadas a partir del cual se calculó un nuevo controlador para el sistema. Se simuló su comportamiento y se proyectó la variabilidad del ancho de plancha, dando como resultado ± 1 mm a diferencia de la variación con el controlador actual que es de ± 2 mm. Dichos resultados muestran la efectividad del nuevo controlador.

Se consiguió el modelo matemático del horno. Para ello se dividió el funcionamiento en tres partes. En primer lugar, se formularon las ecuaciones que influyen en el calentamiento de la resistencia. Después, se expresaron las ecuaciones que inciden en el calentamiento del horno a través de la radiación y convección. Por último, se emplearon las ecuaciones que influyen en el calentamiento de la temperatura de la pared del horno. Sin embargo, la última parte no fue calculada debido a que no se cuenta con la información específica del aislante en las paredes del horno. En su lugar se usaron valores mediante el sistema adquisición de datos que posee el equipo.

Se encontró un modelo matemático que se ajusta mejor al funcionamiento real del horno. Esto se evidencia al calcular la raíz del error cuadrático medio del modelo matemático, que es menor en comparación al modelo obtenido por identificación de sistemas. Por lo que se concluye que el modelo matemático obtenido en este trabajo tiene una validación superior a la que se obtuvo en el sistema de control actual.

Se simuló un sistema que utiliza el controlador actual del horno acoplado al modelo matemático encontrado. Se evidenció que la dinámica de funcionamiento del horno es más lenta respecto a la simulación del sistema de control actual. Esto se debe a que el modelo matemático toma en cuenta distintos fenómenos que suceden, como la pérdida de calor en las paredes del horno. Por esta razón fue necesario calcular un nuevo controlador que se ajuste de mejor forma al modelo matemático.

Se determinó otro controlador que mejoró el comportamiento final del sistema. Sin embargo, este no fue obtenido mediante los cálculos tradicionales de controladores PID. En su lugar se emplearon técnicas de sintonización automáticas disponibles en Simulink (herramienta PID tuner). La principal diferencia está en que el controlador no es calculado en los términos de comportamiento inicial deseados por el usuario (sobre oscilación 2 %, tiempo de estabilización 3600

segundos). La sobreoscilación, en este caso, es de aproximadamente de 3,5 % y tiempo de estabilización de 4000 segundos.

Se realizó la validación del modelo matemático obtenido por medio del análisis de datos del ancho de las placas de polipropileno. Para ello fue necesario calcular una función que relacione la temperatura con el ancho de dichas placas. Al comparar los resultados de los dos sistemas (actual y nuevo), se concluye que el nuevo sistema de control tiene una variación de ± 1 mm, mientras el actual sistema de control tiene una variación de ± 2 mm.

Para obtener una mejor validación de los sistemas referentes al ancho de placas es necesario diseñar mejores métodos de registros de información, que almacenen la temperatura junto a las características dimensionales específicas en tiempo real. Es decir, conocer el ancho que tiene la plancha en el instante que el horno tiene un determinado valor de temperatura. Para ello sería necesario implementar un sistema más complejo de adquisición de datos que incidiría directamente en costos de producción, lo que, por el momento, no es factible en la planta de producción.

Referencias

- [1] European Parliament. (2014) Plastic garbage: from waste to resource. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xwkPJ6>
- [2] A. Méndez Prieto, “Reciclado de plásticos de uso agrícola,” *Integra. Revista de la Asociación Ecuatoriana de Plásticos*, no. 58, pp. 24–26, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3aVgjMF>
- [3] M. E. Olivo Silva and J. L. Cortés Llanganate, “Diseño e implementación de un sistema SCADA para el monitoreo de máquinas del proceso de producción de traslúcido para Techoluz de Tubasec CA,” Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Ecuador. 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3zzQgVx>
- [4] J. L. Cortés-Llanganate, “Diseño de un sistema de control de temperatura para los hornos de termoformado de la máquina de láminas P7 de Techoluz en Tubasec CA,” Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Ecuador. 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Qq8iQ3>
- [5] M. I. Neacă and A. M. Neacă, “Modeling and simulation of the transient heating regime in an electrical oven,” in *2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*, vol. 3, 2010, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/AQTR.2010.5520672>
- [6] —, “Mathematical model for resistive tubular heater,” in *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 2016, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICATE.2016.7754676>
- [7] M. I. Neacă, “Simulink model for resistive tubular heater,” in *2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 2018, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICATE.2018.8551453>
- [8] —, “Comparative simulation of the dynamic regimes of resistive heating elements,” in *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, 2019, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SIELMEN.2019.8905842>
- [9] J. L. Throne, “Heating semitransparent polymers in thermoforming,” *Thermoforming Quarterly*, vol. 8, 1999.
- [10] J. L. Throne and P. J. Mooney, “Thermoforming: Growth and evolution,” *Thermoforming Quarterly*, vol. 50, no. 11, p. 113, 2005.
- [11] S. A. Khan, P. Girard, N. Bhuiyan, and V. Thomson, “Improved mathematical modeling for the sheet reheat phase during thermoforming,” *Polymer Engineering & Science*, vol. 52, no. 3, pp. 625–636, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/pen.22125>
- [12] E. S. Erdogan and O. Eksi, “Prediction of wall thickness distribution in simple thermoforming moulds,” *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 60, no. 3, pp. 195–202, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2013.1486>
- [13] M. Chy, “Estimation and control of plastic temperature in heating phase of thermoforming process,” Ph.D. dissertation, McGill University. 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/39s46Pe>
- [14] F. M. Schmidt, Y. Le Maout, and S. Monteix, “Modelling of infrared heating of thermoplastic sheet used in thermoforming process,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 143–144, pp. 225–231, 2003, proceedings of the International Conference on the Advanced Materials Processing Technology, 2001. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00291-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00291-7)
- [15] M. Ajersch, *Modeling and real-time control of sheet reheat phase in thermoforming*. McGill University, 2004. [Online]. Available: <https://bit.ly/3zEJWMK>

- [16] M. I. Chy and B. Boulet, "Development of an improved mathematical model of the heating phase of thermoforming process," in *2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2011, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IAS.2011.6074343>
- [17] KANTHAL. Podemos electrificar cualquier proceso de calentamiento. Sandvik AB. [Online]. Available: <https://bit.ly/3MKUKfb>
- [18] D. S. Mendoza, J. Solano, and R. Correa, "Modelo de operador fraccional para describir la dinámica de los supercondensadores," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, no. 3, pp. 79–86, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n3-2020008>
- [19] M. A. Moreno, *Apuntes de control PID*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz - Bolivia, 2001, vol. 8.
- [20] V. V. Patel, "Ziegler-Nichols tuning method," *Resonance*, vol. 25, no. 10, pp. 1385–1397, Oct 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12045-020-1058-z>
- [21] M. D. I. Putri, A. Ma'arif, and R. D. Puriyanto, "Pengendali Kecepatan Sudut Motor DC Menggunakan Kontrol PID dan Tuning Ziegler Nichols," *Techno (Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto)*, vol. 23, no. 1, 2022. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.30595/techno.v23i1.10773>



ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y MODAL DE LAS PLACAS ADAPTACIÓN PARA MARTILLOS HIDRÁULICOS Y MINICARGADORES EN CONDICIONES REALES DE OPERACIÓN

STRUCTURAL AND MODAL ANALYSIS OF ADAPTER PLATES FOR HYDRAULIC HAMMERS AND SKID STEERS UNDER REAL WORK CONDITION

Yuri Villa^{1,*} , Trevor Vook¹ , Jorge L. Villa² , Pablo Carbajal³ ,
Leonardo Barrera⁴ , Max Florez⁵

Recibido: 16-05-2022, Recibido tras revisión: 13-06-2022, Aceptado: 15-06-2022, Publicado: 01-07-2022

Resumen

En Perú, la necesidad de proyectos de servicios como la instalación de redes de gas para los residentes, ha incrementado la demanda del uso de martillos hidráulicos (HH) con cargadores compactos debido a la baja inversión en comparación con otros equipos de maquinaria y la versatilidad. La facilidad para intercambiar martillos hidráulicos con cucharones para completar las etapas de demolición y limpieza ofrecen para los contratistas una alta productividad en comparación con una operación manual. Por esa razón, el software de diseño virtual Inventor Professional fue usado para diseñar una placa de adaptación con la resistencia y durabilidad adecuadas, lo cual tiene un impacto directo sobre la estructura del martillo hidráulico y el brazo hidráulico del cargador compacto. Simultáneamente, se desarrolló una animación básica para explicar el efecto del estilo de operación sobre los martillos hidráulicos y las placas de adaptación. Finalmente, para este desarrollo, se consideró la construcción de la placa de adaptación como un fusible en el sistema, en caso de que los operadores excedan la capacidad de resistencia de la estructura del martillo hidráulico.

Palabras clave: diseño, martillo hidraulico, mini-cargadores, platos adaptadores, Inventor Profesional, Ansys

Abstract

In Perú the need for utility projects such as gas network installation for residents has increased the demand for the use of Hydraulic Hammers (HH) with mini-loaders, due to the low investment required compared to other machinery equipment and to the versatility. The easiness to interchange hydraulic hammers with buckets to complete the demolition and cleaning stages offers for contractors a higher productivity than manual operations. For that reason, the virtual design software Inventor Professional was used to design a suitable adapter plate with adequate resistance and durability, which has a direct impact on the structure of the hydraulic hammer and the hydraulic arm of the skid steers. Simultaneously, a basic animation was developed to explain the effect of the operation style over the hydraulic hammers and the adapter plates. Finally, for this development, it was considered the construction of an adapter plate as a fuse in the system, in case operators exceed the resistance capacity of the hydraulic hammer structure.

Keywords: Design, hydraulic hammer, skid steer, adapter plate, Inventor Professional, Ansys

^{1,*}Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina State University, United States.
Autor para correspondencia ✉: yvillar@ncsu.edu.

²École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.

³Departamento de Gestión empresarial, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.

⁴Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de San Martín de Porres, Lima.

⁵Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.

Forma sugerida de citación: Villa, Y.; Vook, T.; Villa, J. L.; Carbajal, P.; Barrera, L. y Florez, M. "Análisis estructural y modal de las placas adaptación para martillos hidráulicos y minicargadores en condiciones reales de operación," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 28, pp. 92-99, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.09>.

1. Introducción

En Sudamérica es común construir carreteras sin redes de servicio instaladas porque los proyectos de servicios ejecutados están limitados por el capital de inversión. La necesidad de mejorar la calidad de vida y de expandir los servicios para residentes abrió un mercado enorme para productos de demolición tales como martillos hidráulicos [1].

Proyectos tales como instalaciones de tuberías de gas requieren la construcción de zanjas, que comienzan con el corte de superficies duras de pavimento de concreto o asfalto para crear aberturas de 20 cm de ancho, en promedio. Para demolición se emplean los martillos hidráulicos montados en un cargador compacto, los cuales también pueden ser usados para limpiar el material de desecho removido y para restauración [2].

En Perú se utilizaron un cargador compacto Case SR220 y un martillo hidráulico SB202 en proyectos de construcción para masificación de gas natural. El martillo tiene características especiales como una estructura sólida del cuerpo, una válvula de recarga de grasa localizada en la parte superior del cuerpo, y la sección más angosta de la caja de 17 cm de ancho, lo cual reduce la energía invertida para varios kilómetros de instalación de tubería de gas [3].

Al mismo tiempo, la demanda de nuevos operadores y contratistas para instalar tuberías de gas estimuló la demanda de sistemas de cargador compacto-placa de adaptación-martillo hidráulico. Debido a las estrategias de mercado de los proveedores, se perdió el énfasis en la importancia de la placa de adaptación y su impacto potencial en el desempeño y tiempo útil de los martillos hidráulicos. La demanda de entrenamiento, nuevas estrategias y diferentes propuestas de solución se incrementó cuando la tasa de reclamos aumentó de 5 % a 35 %, particularmente para daños irreparables en los martillos hidráulicos [4].

Soluciones Barrera EIRL, un importante fabricante local de placas de adaptación, con una participación de 60 % de productos Atlas Copco SB202 y Case SR202 en el mercado cerrado, realizó una investigación independiente usando análisis virtual avanzado. Esta compañía es una de las más innovadoras en el mercado peruano.

Luego de evaluar la naturaleza y la recurrencia de la falla, se detectó una relación entre las pobres habilidades de operación, la resistencia extrema y dureza de la placa de adaptación, y la presencia de otros fabricantes de placas de adaptación, sin adherirse a estándares de ingeniería. De manera similar, el énfasis no estaba en la evaluación y el control de los efectos dañinos [5].

Como resultado, se estableció el objetivo de construir la placa de adaptación como un fusible en el sistema. Se utilizó simulación virtual estática y dinámica para diseñar una nueva placa de adaptación con In-

ventor Professional. Posteriormente, el análisis Ansys confirmó el comportamiento. Para complementar el registro de desempeño y reclamos, se hizo un grupo de placas de adaptación para mejorar el proceso de construcción y la calidad del producto y, finalmente, reducir el costo.

2. Materiales y métodos

2.1. Panorama general

En 2004, el proyecto de Gas Camisea, que costó 3,9 billones de dólares (USD), comenzó un proceso de masificación de gas en Perú. Debido a la intensidad de esta actividad, se estableció un método para instalar tuberías en el suelo a una profundidad de 30 cm. Esta profundidad creó la recomendación técnica de construir zanjas con una profundidad de 70 cm. Parte del trabajo fue realizado en calles pavimentadas con concreto o asfalto, y por esa razón fue necesario demoler la dura superficie de las carreteras, haciendo previamente cortes de 20 cm de ancho [6, 7] (Figura 1).



Figura 1. Construcción, demolición y excavación de zanjas [8]

Ventas de referencia históricas de 2014 de un grupo de quince sistemas de cargador compacto, placa de adaptación y martillo hidráulico presentó un número alto de reclamos por garantía debido a fallas en el cuerpo sólido de los martillos hidráulicos. Después de una evaluación exhaustiva utilizando un líquido penetrante, se detectó la formación de grietas en los martillos hidráulicos.

Se realizó una investigación para entender el origen de la falla, que estuvo relacionada con la sobrecarga en el martillo. Una posible explicación fue extrapolada debido a otras fallas en puntos de corte, bujes y pistones. Al mismo tiempo, cuatro cargadores compactos mostraron la formación inicial de microgrietas en sus brazos. En consecuencia, se estableció una hipótesis considerando el sistema cargador compacto-placa de

adaptación–martillo hidráulico como una sola unidad donde la vibración y la resonancia durante el proceso de demolición viajaron a través del sistema y produjo grietas en la parte menos resistente del sistema. Como una segunda parte del método, se estableció un nuevo prototipo considerando la placa de adaptación como un fusible, lo cual se explica en esta investigación [9].

2.2. Cargadores compactos, una máquina multipropósito

Los cargadores compactos se usan en diferentes industrias como un transportador compacto multipropósito para la construcción, manejo de vehículos de materiales y equipo agrícola [10]. En combinación con martillos hidráulicos pueden implantarse algunos métodos de demolición, usando como recomendación la especificación de tasa de flujo hidráulico, presión estática, y la resistencia del martillo al peso detallada como una referencia [11].

Adicionalmente, la decisión del tamaño del cucharón estaba relacionado con la densidad del material manipulado; en este caso, concreto viejo o asfalto, con un espesor de 5-20 cm y suelo compactado, se levantaron como material de desecho desde la superficie hacia camiones. En esta experiencia, el modelo Case SR220 se montó con cucharones de trabajo pesado de 240 kg con una capacidad de 0,44 m³, reportados por los clientes y respaldado por el catálogo [12].

2.3. Selección del martillo hidráulico de acuerdo con la condición de operación

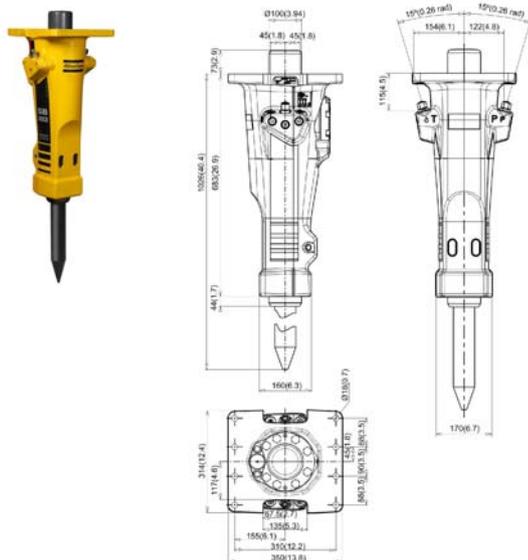


Figura 2. Martillo hidráulico Atlas Copco SB202 [3]

Las condiciones de borde fueron el ancho mínimo de la zanja, la profundidad de 70 cm y, dado que las

operaciones se realizaban dentro de la zanja, la boquilla de lubricación del martillo ubicada por diseño en la parte superior del mismo. Bajo condiciones exigentes se utilizó un martillo con mayor resistencia a sobrecargas y construido con un mínimo número de partes internas. Por esa razón, se seleccionó un cargador compacto Case SR220 equivalente al modelo Caterpillar 236B, con un interruptor hidráulico Atlas Copco SB202 de cuerpo sólido [13] (Figura 2).

2.4. Impacto sobre el cargador compacto y la durabilidad del interruptor hidráulico

Un buen mantenimiento y un diseño adecuado de la placa de adaptación para el martillo hidráulico permite obtener el máximo resultado. Se realizaron pruebas diagnósticas para detectar fallas menores con el fin de arreglarlas, lo cual es una parte importante de un programa de mantenimiento preventivo. Los contratistas reportaron una disponibilidad operativa entre 61 % y 81 % luego que se aplicó un plan estratégico para mejorarla [14].

La configuración estándar fue el uso del SB202 debido a sus características especiales, su diseño patentado, resistencia a sobrecargas y ubicación más alta de la válvula de lubricación. No se midió la confiabilidad del martillo, pero contratistas reportaron que era mayor que la de otros productos.

2.5. Condiciones reales de operación



Figura 3. Cargador compacto operando con el martillo hidráulico SB202 [15]

Li *et al.* [16] reportaron la formación de grietas como resultado del uso del martillo hidráulico empleando Ansys Workbench, que mostró el comportamiento en la estructura del brazo en un sistema articulado cuando se emplea un martillo hidráulico. Los parámetros fundamentales acerca del impacto potencial y la formación de grietas fueron tomados de forma referencial de las operaciones reales registradas. La hipótesis fue probar la placa de adaptación como un fusible

para proteger la integridad del martillo y del cargador compacto, considerando la condición de máxima sobrecarga cuando los operadores utilizan presión hidráulica excesiva con el brazo-martillo sobre la superficie para demolición, y en un ángulo de operación no-alineado de 90° (entre el martillo y la superficie). Esta puede ser considerada la condición de operación más extrema y, por esa razón, se abrió una línea de investigación para optimizar la placa de adaptación (Figura 3).

2.6. Fabricación de la placa de adaptación

Se tomaron mediciones físicas del martillo hidráulico Atlas Copco SB202 y de la región superior de montaje del brazo, considerando las mediciones tridimensionales para conectar ambas máquinas, y posteriormente se hizo un dibujo tridimensional utilizando el *software* Inventor Professional and Ansys para analizar el comportamiento estructural estático y dinámico bajo una frecuencia de impacto máxima de 1800 golpes por minuto (BPM, *Blows per Minute*, por sus siglas en inglés). Para el análisis, la placa de adaptación se hizo independiente del sistema del brazo del cargador compacto y el martillo hidráulico. Se aplicaron condiciones de borde tales como la gravedad, el peso de 16 750 N aplicado a la placa de adaptación y la fuerza hidráulica en regiones de contacto con el martillo y cargador compacto.

2.7. Criterios para el rediseño de la placa de adaptación

Tabla 1. Condiciones operacionales de borde para el sistema cargador compacto-placa de adaptación-martillo hidráulico

Condiciones de borde (usadas para Inventor y la simulación en Ansys)	
Operación	Demolición
Peso del cargador compacto Case modelo SR220	33 752 N
Sistema de acoplamiento	Mecánico
Material para la placa de adaptación	Acero al carbón ASTM A-36
Turno en un día de trabajo común	12 h
Tiempo efectivo de percusión por turno	1-3 h
Tiempo total de uso por mes	30-90 h

El rediseño de la placa de adaptación fue hecho considerando un material suave en la primera etapa de análisis, y siguiendo los resultados de los primeros seis meses, ellas fueron rediseñadas con un refuerzo que aumentó la vida útil a más de un año de operación estándar. El sistema cargador compacto-placa de adaptación-martillo hidráulico fue usado para la

demolición de la cubierta fuerte de la carretera (asfalto viejo, concreto) y para romper la estructura compactada del suelo (Tabla 1).

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis estático

Se realizó un análisis estático con carga utilizando Autodesk 2020 Inventor Professional, considerando que el peso del cargador compacto con accesorios es de 33 752 N (Tabla 1); como resultado de la operación observada, se consideró un peso de 16 750 N (Figura 2). Debido a las dos regiones de contacto entre el brazo y la placa de adaptación, se aplicó una fuerza de 8375 N a cada área de contacto y se aplicó una fuerza de 16 750 N a la superficie de contacto entre la placa de adaptación y el martillo hidráulico (Figura 4).

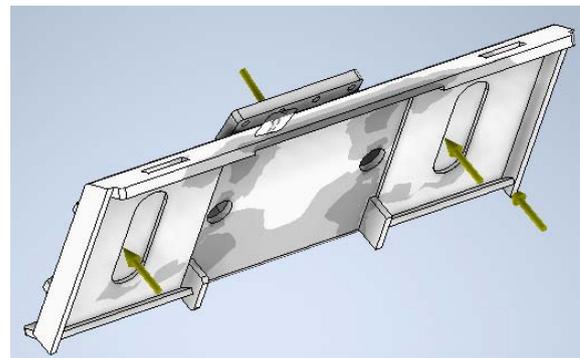


Figura 4. Placa de adaptación construida en Inventor

Para el análisis de mallado en Autodesk Inventor 2020 (Figura 5), el tamaño promedio de elemento utilizado fue 0,05, el mínimo tamaño de elemento fue 0,1, el factor de calibración 1,5 y el máximo ángulo de giro 30 grados. Geométricamente, la placa de adaptación fue diseñada considerando formas planas, reduciendo la presencia de curvaturas. La Tabla 2 detalla recomendaciones de referencia.

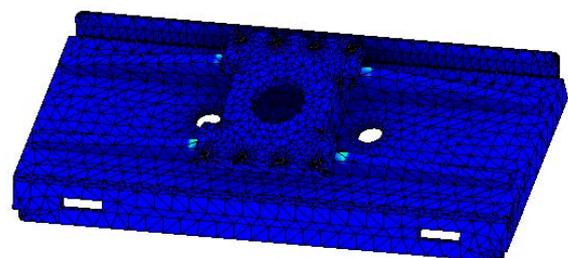


Figura 5. Mallado de la placa de adaptación

Tabla 2. Autodesk Inventor 2020: Recomendaciones para establecer los parámetros de malla y de control

Parámetros	
Tamaño promedio de elemento	0,1 - 0,05
Mínimo tamaño de elemento	0,1 - 0,2
Factor de Grading	1,5 - 3,0
Máximo ángulo de giro en grados	30 - 60

Para el análisis estático, el límite elástico de tracción del acero al carbono ASTM A36 (Tabla 3) utilizado es 250 MPa, con módulo de Young 199,959 GPa, y coeficiente de Poisson 0,3. (Figura 6). Suponiendo un máximo esfuerzo de Von Mises de 31,33 MPa (Figura 6) y un límite de deformación de 0,25 mm, se obtuvo un máximo resultado de desplazamiento de 0,09856 mm (Figura 7).

Tabla 3. Propiedades del acero al carbono ASTM A36 [17]

Material		
Nombre	Steel ASTM 36	
General	Densidad de la masa	7,85 g/cm ³
	Límite elástico de compresión	250 Mpa
	Límite elástico	152 Mpa
	Tensión de rotura	400 Mpa
Esfuerzo	Módulo de Young	19,959 Gpa
	Coficiente de Poisson	0,3 ul
	Módulo de corte	76,9073 Gpa

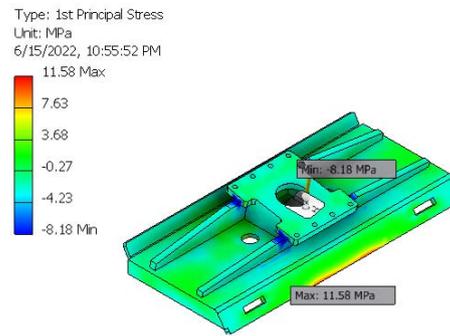


Figura 8. Análisis estático de máximo esfuerzo de tracción

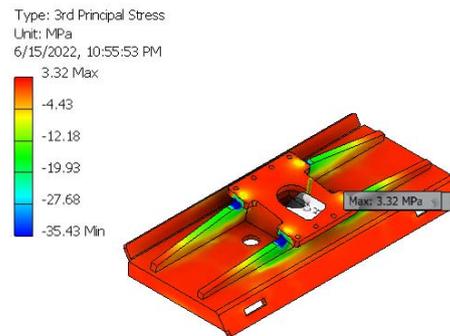


Figura 9. Análisis estático de máximo esfuerzo de compresión

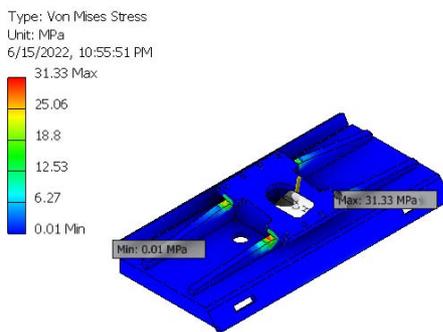


Figura 6. Análisis estático del esfuerzo de Von Mises en Inventor

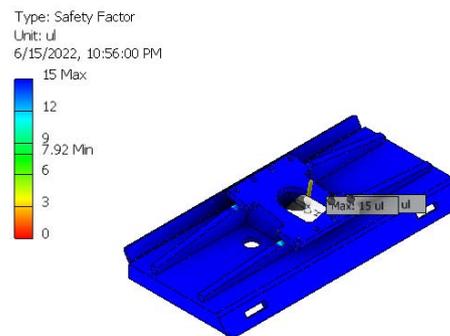


Figura 10. Análisis estático de factor de seguridad

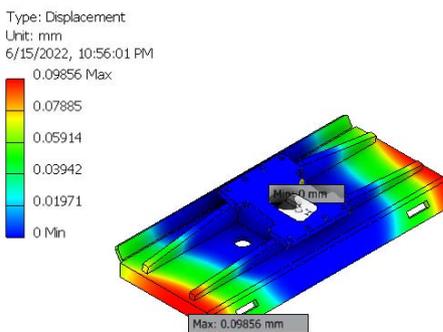


Figura 7. Análisis estático de desplazamiento en Inventor

El esfuerzo máximo de tracción de 11,58 MPa (Figura 8) está por debajo de la condición de Von-Mises (32,38 MPa) (Figura 7), porque el esfuerzo fue distribuido a lo largo de la estructura completa. El esfuerzo máximo de compresión fue 3,32 MPa (Figura 9), que fue observado en las interfaces de la estructura de soporte entre la placa base del martillo y la placa base del cargador compacto. El máximo esfuerzo de compresión del acero al carbono ASTM A36 usado es 152 MPa [18]. El mínimo factor de seguridad fue 7,92 (Figura 7), lo cual significa que se alcanza un alto factor de seguridad con este diseño [19] (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación entre análisis estático y dinámico

Tipo	Esfuerzo estático (Mpa)	Pretensado dinámico excluyente (Mpa)	Pretensado dinámico incluyente (Mpa)	Diferencia porcentual
Max. Esfuerzo principal	11,58	12,37	23,95	48,34 %
Min. Esfuerzo principal	3,32	4,55	7,87	42,19 %

3.2. Análisis modal

La frecuencia de impacto al utilizar un SB202 estuvo en un rango de 850-1800 BPM (máx. 30 Hz). La máxima deformación total fue $3,0405 \times 10^{-6}$ mm en la región de contacto entre la placa de adaptación y el martillo y 0,098 mm en la región central de las áreas de la placa de adaptación (Figura 7).

Se realizó una disminución de esfuerzo para hacer un análisis armónico en Ansys Modal y Harmonic Response. Como un primer análisis, es usual evaluar dónde ocurrieron las relajaciones de esfuerzo y la eliminación del pretensado en la placa de adaptación. El esfuerzo estático fue 11,58 MPa (Tabla 4) en la etapa inicial. Cuando se inicia la acción dinámica, esta situación se relaja primero. El análisis de esfuerzo dinámico fue utilizado para compensar la compresión estática y para llevar a cero el efecto estático con el fin de revertir la resistencia desarrollada dentro del material.

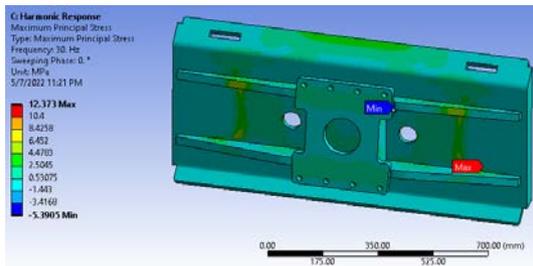


Figura 11. Análisis armónico en Ansys, máxima frecuencia de 30 Hz

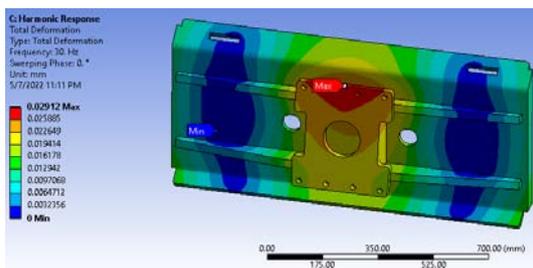


Figura 12. Máximo esfuerzo principal en análisis armónico

El esfuerzo dinámico excluyendo el pretensado fue 12,37 MPa (Figura 11) y el esfuerzo dinámico total

fue 23,95 MPa (Tabla 4). Los valores de las diferencias porcentuales entre los resultados estáticos y dinámicos del esfuerzo máximo principal y esfuerzo mínimo principal son 48,34 % y 42,19 %, respectivamente, los cuales son menores de 50 % (Figura 12).

3.3. Análisis de fatiga

La Tabla 5 muestra el análisis de vida de la fatiga resultante reportado por Ansys; se tuvieron $1,00 \times 10^8$ ciclos hasta la falla estructural (Figura 13). Por esa razón, considerando el desempeño operacional del martillo hidráulico de 600 y 1800 BPM y correlacionando con las horas operacionales por día, resulta en un rango de 308,64 a 925,93 días de operación antes de la falla.

Tabla 5. Análisis de fatiga por ciclos de operación

Item	Valor	Unidades	Valor	Unidades
Ciclos antes de la fatiga (un blow= un ciclo)	1,00E+08		1,00E+08	
Martillos blows per minute	1800	BPM	600	BPM
Considerando una hora	60	min	60	min
Horas operacionales efectivas por día	3	horas	3	horas
Número de días	308,64	días	925,93	días

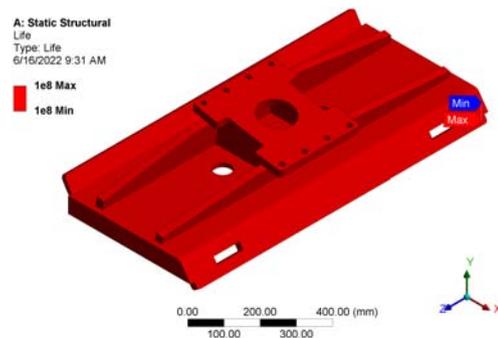


Figura 13. Análisis de vida de la fatiga en ciclos

De forma similar, el factor de seguridad resultante del análisis de fatiga reportó un número mínimo de 4,3599 (Figura 14), es cual es mayor que 1; por tanto, este diseño puede considerarse confiable.

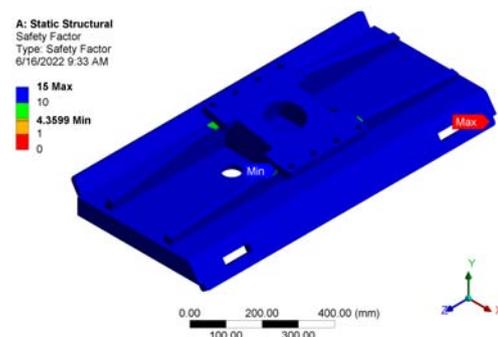


Figura 14. Análisis de fatiga - Factor de seguridad

Debido al máximo esfuerzo de 31,33 Mpa (Figura 6) con un factor de seguridad de 7,92 (Figura 10), esto sostiene hasta $1,00 \times 10^8$ ciclos (Figura 13) antes de la falla estructural. Este desempeño respalda el objetivo de este diseño de alcanzar la máxima durabilidad mientras actúa también como un fusible que protege la estructura del martillo y del cargador compacto en caso de que ocurra una sobrecarga. La carga de esfuerzo reportada todavía está por debajo del límite de resistencia, debido a que a pesar de los $1,00 \times 10^8$ ciclos antes de la fatiga, el factor de seguridad está por encima de 1, lo cual significa que se tiene espacio para una optimización futura.

3.4. Proceso de construcción y soldadura

La placa de adaptación se construyó con acero al carbono ASTM-A36, soldadura 6011 y 7018 con tamaño 5/32", y para el producto final se utilizó una pintura electrostática RAL9005, y cada producto final fue registrado con un número de registro progresivo para el control de calidad del producto y la gestión de calidad (Figura 15).

3.5. Producto estándar para el mercado

Como estrategia comercial, el proveedor ofreció seis meses de garantía estándar e incluyó una optimización actualizada constantemente con alta confiabilidad para usuarios finales, empleando nuevas placas de adaptación como respaldo en caso de problemas de calidad por la presencia de grietas en la estructura (Tabla 2).

Tabla 6. Registro de placas de adaptación y desempeño cualitativo

Placa	Fabricación	Tiempo de uso (meses)	Garantía (meses)	Observación
1	15-ene-15	6	12	Desgaste normal
2	15-ene-15	4	12	Desgaste normal
3	15-ene-15	8	12	Desgaste normal
4	15-ene-15	7	12	Desgaste normal
5	15-ene-15	12	12	Desgaste normal
6	15-ene-15	16	12	Grietas pequeñas
7	15-ene-15	6	12	Desgaste normal
8	15-ene-15	8	12	Desgaste normal
9	15-ene-15	12	12	Desgaste normal
10	15-ene-15	14	12	Grietas pequeñas

Después de catorce meses de uso, un grupo de diez placas de adaptación construidos simultáneamente fueron evaluados físicamente junto con sus reclamos de garantía. Los resultados confirmaron un desgaste normal durante la operación y la presencia de grietas después del período de garantía de doce meses (Tabla 6). Al mismo tiempo, no se observaron grietas en la estructura sólida del martillo o del cargador compacto, y se desarrollaron animaciones y videos de entrenamiento complementarios para explicar el efecto para los consumidores de la operación inapropiada [15]. El

entrenamiento y la operación apropiada contribuyeron a reducir el daño de los martillos hidráulicos.

Finalmente, este producto ha sido una solución probada desde 2015 hasta el presente para el sistema cargador compacto-martillo, para aplicaciones de demolición en el mercado peruano; sin embargo, su precio representa un 20 % del precio de adquisición, y por esa razón es recomendable comenzar una investigación de optimización para reducir los costos de producción. Esta placa de adaptación fue estandarizada para ser usada por la mayoría de las marcas que trabajan con martillos Atlas Copco y cuya producción en serie sobrepase las quinientas unidades con un desempeño confiable hasta el presente, de manera de tener, como resultado, menor cantidad de reclamos por garantía y efectos colaterales sobre martillos hidráulicos.



Figura 15. Placa de adaptación como producto final

4. Conclusiones

El esfuerzo aplicado a lo largo del sistema (cargador compacto-placa de adaptación-martillo hidráulico) durante la demolición de capas superiores, pavimento y asfalto de carreteras, fue identificado como la principal preocupación de este estudio y el estilo de operación. Por esa razón, como parte del desarrollo de un producto optimizado, se realizaron videos de entrenamiento para mejorar las aptitudes operacionales.

Como complemento se estableció una estrategia de reclamo de garantía para restablecer la confianza en los productos, y se designó un proveedor exclusivo incluyendo una respuesta de garantía confiable, lo cual contribuyó a reintroducir el producto reduciendo los reclamos de garantías por fallas en martillos hidráulicos un 99 % durante los doce meses siguientes.

Existe espacio para un proceso de optimización, porque el factor de seguridad obtenido es mayor a 7,95 y la diferencia porcentual entre los resultados estáticos y dinámicos fue menor al 50 %, y en la industria, se utiliza una referencia del 20 % para obtener resistencia máxima. Sin embargo, los picos de esfuerzo no exceden el límite elástico de tracción del acero al carbono ASTM A36 que es 250 MPa, ni el máximo esfuerzo de

compresión de dicho acero que es 152 MPa. La estrategia confirmó el uso de la placa de adaptación como un elemento para proteger el martillo y el cargador compacto de la deformación.

Se demostró que la placa de adaptación actúa como un fusible protector del martillo y del brazo del cargador compacto, confirmando la hipótesis de este trabajo. Se recomienda la innovación continua para mejorar la confiabilidad de la placa de adaptación y el desempeño en los sitios de trabajo, los cual mejorará la reputación del producto en el mercado.

Referencias

- [1] N. Montes de Oca and S. Velut, “Energy modernisation and regional reorganisation of the southern Andes: The unexpected materialities of the southern peruvian gas pipeline,” *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, pp. 1–16, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4000/rga.9465>
- [2] S. Maroye and A. Aerssens, “Natural gas distribution network of Lima and Callao, Peru,” 2005. [Online]. Available: <https://bit.ly/3A4d6ox>
- [3] Atlas Copco, *Safety and operating instructions Hydraulic breakers*. Construction Tools PC AB, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3u2XyxL>
- [4] ITM, *Manual de Seguridad y Bioseguridad para los Laboratorios de Química del ITM*. Instituto Tecnológico Metropolitano, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3btbhqS>
- [5] T. Yalçın, “Design of a skid steer loader,” 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ngsjv0>
- [6] L. Leung and G. P. Jenkins, “An economic evaluation of Peru’s liquefied natural gas export policy,” vol. 74, pp. 643–654. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.06.028>
- [7] Cálidda, “Instrucciones y recomendaciones técnicas para obras que impliquen trabajos sobre o cerca de instalaciones de gas natural.” [Online]. Available: <https://bit.ly/3HWp19R>
- [8] —, “Guía del plan de prevención de daños (PPD),” 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3noe47r>
- [9] I. J. Sokolov, V. I. Babitsky, and N. A. Halliwell, “Synthesis of dynamical structure of the hydraulic breaker with a vibration-free handle,” *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pp. 1503–1511, 09 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/DETC2007-34667>
- [10] D. A. Ashcroft, E. H. Priepeke, and W. J. Sauber, “Design and development of new generation skid steer loaders,” *SAE Transactions*, vol. 103, pp. 252–258, 1994. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/44473342>
- [11] Wheeler CAT, “Caterpillar performance handbook,” 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3u20ISq>
- [12] CASE, “Skid steer loadertier 4 interim certified,” 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bv1nVV>
- [13] Epiroc, “Spare parts list hydraulic breakers SB 202,” 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xY5PE4>
- [14] A. Palomino-Valles, M. Tokumori-Wong, P. Castro-Rangel, C. Raymundo-Ibáñez, and F. Domínguez, “TPM maintenance management model focused on reliability that enables the increase of the availability of heavy equipment in the construction sector,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 796, no. 1, p. 012008, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/796/1/012008>
- [15] Y. Villa, *Explicación práctica de uso de martillos hidráulicos*. Atlas Copco Peruana, 2014.
- [16] J. Li, Y. Wang, K. Zhang, Z. Wang, and J. Lu, “Design and analysis of demolition robot arm based on finite element method,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 6, p. 1687814019853964, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/1687814019853964>
- [17] P. Preedawiphat, N. Mahayotsanun, K. Sangoen, M. Noipitak, P. Tuengsook, S. Sucharitpwatskul, and K. Dohda, “Mechanical investigations of ASTM A36 welded steels with stainless steel cladding,” *Coatings*, vol. 10, no. 9, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/coatings10090844>
- [18] Matweb, “Matweb-astm a36 steel, bar,” 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3OJ0Uh2>
- [19] K.-l. Lu, W.-g. Zhang, Y. Zhang, H. Huang, Y.-s. Chen, W.-y. Li, and C. Wang, “Crack analysis of multi-plate intersection welded structure in port machinery using finite element stress calculation and acoustic emission testing,” *International Journal of Hybrid Information Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 323–340, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14257/ijhit.2014.7.5.30>



ANÁLISIS COMPARATIVO DE CONFORT TÉRMICO DE VIVIENDA UNIFAMILIAR EN LSF FRENTE A MAMPOSTERÍA

COMPARATIVE ANALYSIS OF THERMAL COMFORT OF A SINGLE-FAMILY HOUSE IN LSF AND BRICK MASONRY

Rodrigo Brito-Peña^{1,*} , Daniel Villa-Enderica¹ , Esteban Zalamea-León¹ 

Recibido: 16-05-2022, Recibido tras revisión: 17-06-2022, Aceptado: 20-06-2022, Publicado: 01-07-2022

Resumen

La construcción residencial en Ecuador ha crecido un 35,6 %. El sistema constructivo típico para envolvente de viviendas es de bloque de concreto o de ladrillo, la construcción en LSF (*Light Steel Framing*) o marcos de acero galvanizado (LSF) está en surgimiento. Para solucionar la demanda habitacional se evalúa el confort interior térmico de una de vivienda unifamiliar de dos plantas en la ciudad de Cuenca con ambos sistemas constructivos para conocer los estándares de confort que ofrecen las viviendas en concordancia con la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). La investigación se realizó con Design Builder y Therm donde se analizan los parámetros que influyen en el desempeño energético de las viviendas. Con las condiciones locales, el sistema predominante alcanza valores de confort térmico horario anual del 51 %, pero el sistema LSF alcanza un 62 %. Sin embargo, con estrategias de mejoramiento en la globalidad de la envolvente, el LSF alcanza el 86 %. Las variables en orden de mayor a menor influencia térmica resultaron: infiltraciones de aire, sistema constructivo de la envolvente e implantación de la vivienda. En Cuenca es posible el uso del LSF con aislamiento mínimo para alcanzar niveles aceptables de confort, siendo una alternativa adecuada a promover para edificar viviendas unifamiliares.

Palabras clave: vivienda, *steel frame*, confort térmico, simulación

Abstract

Residential construction in Ecuador has recently grown by 35.6%. The typical construction system for housing envelopes is concrete block or brick, construction in LSF, Light Steel Framing or galvanized steel frames (LSF,) is emerging. To solve the housing demand, the thermal interior comfort of a two-story single-family home in the city of Cuenca is evaluated with both construction systems to know the comfort standards offered by homes in accordance with the Ecuadorian Construction Standard. (NEC). The research was carried out with Design Builder and Therm where the parameters that influence the energy performance of homes are analyzed. Under local conditions, the predominant system reaches annual hourly thermal comfort values of 51%, but the LSF system reaches 62%. However, with improvement strategies in the overall envelope, the LSF reaches 86%. The variables in order from greater to lesser thermal influence resulted: Air infiltrations, construction system of the envelope and implantation of the house. In Cuenca it is feasible to use the LSF with minimum insulation to reach acceptable levels of comfort, being an adequate alternative to promote to build single-family homes.

Keywords: Housing, Light Steel Framing, Thermal comfort, Simulation

^{1,*}Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca, Universidad de Cuenca, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: jrodrigo.britop@ucuenca.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Brito-Peña, R.; Villa-Enderica, D. y Zalamea-León, E. "Análisis comparativo de confort térmico de vivienda unifamiliar en LSF frente a mampostería," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 28, pp. 100-124, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.10>.

1. Introducción

Para cada contexto particular es importante establecer análisis comparativos de diferentes tecnologías constructivas para establecer capacidades en cuanto a seguridad, durabilidad, calidad, confort térmico, entre otros aspectos. Se ha evidenciado que el comportamiento térmico de sistemas constructivos en seco como *Lightweight Steel Framing* (LSF) pueden alcanzar condiciones similares a los de mampostería [1] y se puede definir niveles de aislamiento apropiado para el contexto.

De acuerdo con el Instituto Americano de Arquitectos (AIA, 2007), el 50 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero fueron producidas por la industria de la construcción. En gran parte como consecuencia del alto consumo de las edificaciones y falta de confort en las mismas. Se genera impacto desde la fabricación, transporte, ejecución, uso y mantenimiento de la edificación hasta el fin de su ciclo funcional [2]. Asimismo, la construcción se ubica como la segunda industria con mayor demanda energética en el mundo siendo en gran parte del consumo para lograr calidad ambiental interior [3, 4]. Por lo tanto,

es importante determinar la aptitud de los materiales de construcción para lograr calidad en confort térmico con alto grado de eficiencia constructiva [5, 6]. En Ecuador, en los últimos quince años, el sector de la construcción ha crecido un 35,6 % debido al desarrollo económico y poblacional. En 2018 del total de permisos de construcción, el 84,1 % corresponde a residencias, el 56,9 % corresponde a viviendas unifamiliares, y el 88,1 % son viviendas nuevas.

Los materiales predominantes para vivienda en Ecuador son hormigón armado para cimentaciones, estructura y cubiertas, mampostería de bloque de concreto o ladrillo para paredes y cerramientos, estructuradas en acero por velocidad constructiva. La introducción de sistemas constructivos alternativos es mínima, y se toma muy poco en cuenta afectaciones que devienen de la materialidad seleccionada. La vivienda de construcción en seco tipo LSF apenas tiene una cuota del 2,9 % en el Ecuador [7] como se observa en la Figura 1 [7]. Los sistemas que permiten prefabricación son una oportunidad para reducir el costo en la construcción, pero también deben considerarse niveles de confort [8].

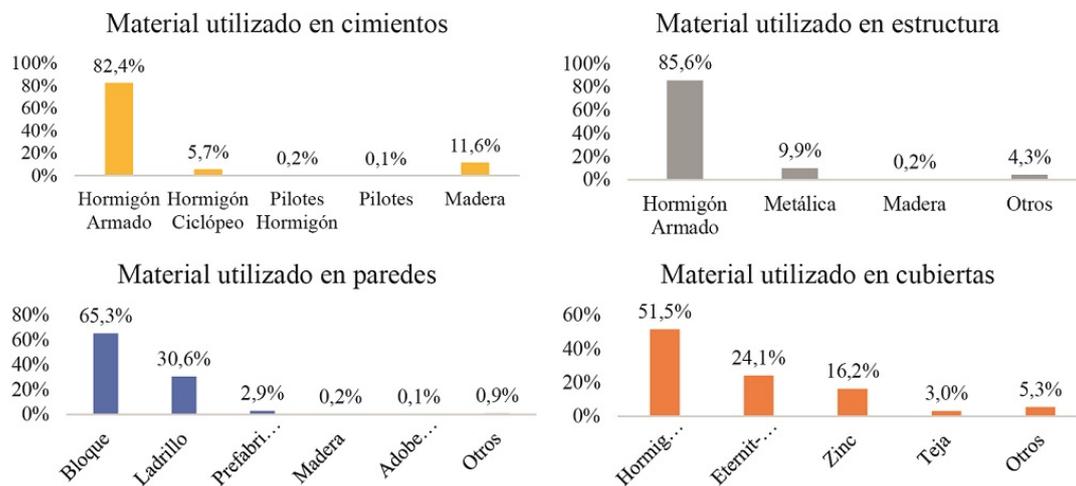


Figura 1. Materiales principales que predominan en la construcción en Ecuador

La implementación del sistema en seco LSF puede resultar menos ofensiva con el ambiente y ofrece grandes ventajas en comparación con sistemas tradicionales húmedos en cuanto a impacto *in situ* [9]. Diversas ventajas constructivas son propias de este sistema como la potencial prefabricación y rapidez, durabilidad, capacidad sismorresistente precios convenientes, entre otras [10]. El LSF posee buen desempeño térmico dado que se puede incluir el aislamiento requerido y calibrado acorde con las condiciones locales, tiene la capacidad de alcanzar altos niveles de aislación térmica inclusive en climas extremos [11, 12].

Además, el principal déficit en cuanto a la capacidad térmica en el LSF según [13] y [9], está en los puentes térmicos como consecuencia de los marcos estructurales de acero liviano que no deben estar separados más de 0,60 m entre ellos. En capacidad estructural, el LSF posee condiciones apropiadas por la menor rigidez y peso, lo que implica que la respuesta sísmica sea adecuada en regiones de alta sismicidad como lo es la zona andina [14, 15]. Así mismo, responde favorablemente a cargas accidentales [16].

En materia de seguridad ante incendios, el LSF es recomendable por encima de otras tecnologías no ignífugas [17]. Al mismo tiempo, es capaz de integrar todos los componentes necesarios para construir una edificación. Los métodos de construcción son de fabricación en obra, por paneles prefabricados y, finalmente, la construcción modular [18]. El LSF tiende a ser más costoso en comparación a viviendas de mamposterías típicas en Ecuador por la reducida penetración del material. No obstante, por las ventajas de industrialización y economía de mercado puede resultar en un sistema conveniente [19]. Se reduce el costo de mano de obra entre un 62,5 % a un 73 %, mejor gestión de insumos y operaciones y logística en los sitios de construcción [20]. En Ecuador, el déficit de vivienda sumado a la difícil situación económica provoca que se produzcan edificaciones de bajo presupuesto con materiales artesanales que hacen que las viviendas no cumplan los niveles adecuados de confort térmico, por lo tanto, las nuevas edificaciones deben cumplir los estándares de la NEC [21].

1.1. Condiciones climáticas del entorno de la vivienda de estudio

Ecuador se divide en seis zonas climáticas en concordancia con lo establecido por la ASHRAE 90.1 y

Miduvi [22]. La vivienda de referencia se encuentra emplazada en la zona climática 3 del Ecuador, determinada como Región Sierra-continental lluviosa. En la Figura 2 se observa un diagrama de las condiciones climáticas 3). La zona está muy próxima a la línea ecuatorial a una altitud de 2550 m s. n. m., por estas condiciones es un clima templado y estable durante el año. La temperatura varía entre promedios máximo y mínimo de 7 y 25 °C, no obstante, se registran máximos extremos de -1,7 °C y de 28,9 °C; el promedio es de 15,6 °C. El mes más caluroso es marzo y el más frío es agosto, pero con condiciones extremas de frío o calor que no perduran normalmente por más de algunas horas. Por las condiciones de ecuatorialidad, las variaciones climáticas estacionales son mínimas. La duración del día también es estable durante el año, siendo el amanecer entre las 05:50 y 06:30 y el atardecer entre las 18:05 y 18:35, dependiendo de la época. La ventosidad es baja y con preponderancia desde el noreste. En consecuencia, se trata de un clima templado con mayor incidencia de enfriamiento excesivo, pero con clima benigno para la habitabilidad, la mayoría de edificaciones carece de sistemas de acondicionamiento activo. Sin embargo, este aspecto implica que sean habituales momentos fuera de confort.

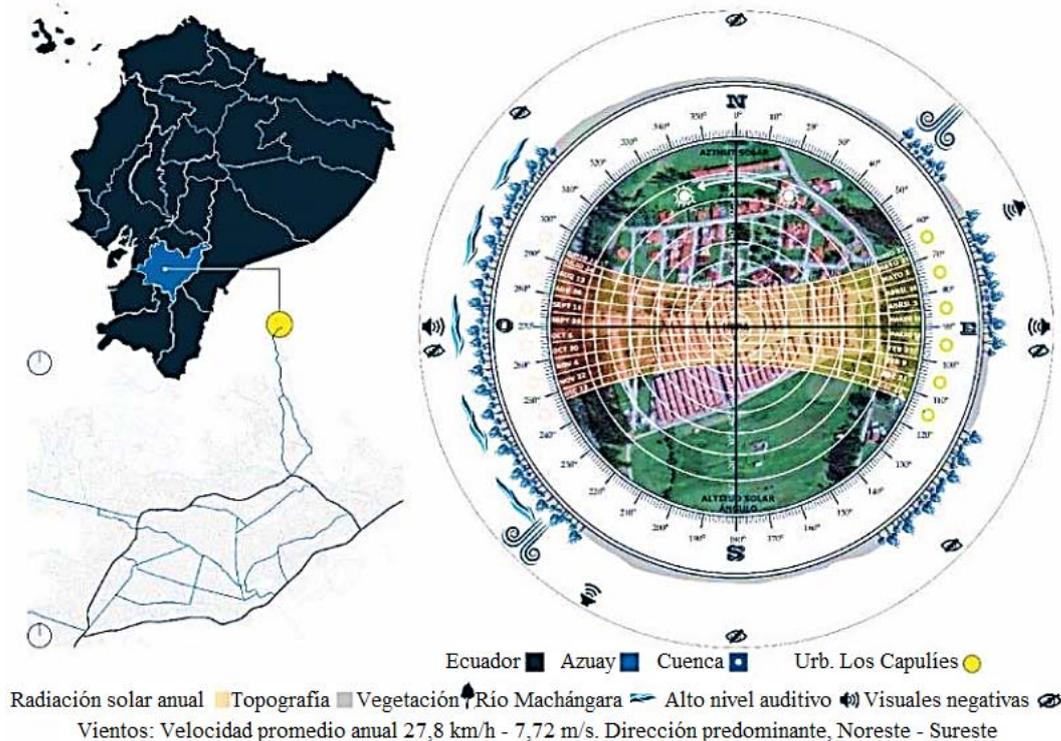


Figura 2. Ubicación y esquema de las condiciones climáticas del entorno

Se analizará una vivienda de características espaciales y morfológicas recurrente en el país, con el sistema constructivo más utilizado de mampostería y hormigón habitual con el objetivo de determinar las condiciones ambientales base. A partir de ello comparar con variaciones en concordancia con el cambio de envolvente en sistema constructivo LSF. Para este fin se programan simulaciones para contrastar el comportamiento térmico de la misma vivienda materializada con dos sistemas constructivos y envolventes distintos, sistema LSF frente al sistema tradicional, suponiendo las mismas condiciones funcionales y espaciales. Se analiza el modelo de vivienda unifamiliar tipo II emplazada en la urbanización Los Capulíes,

ubicada en Cuenca, emprendimiento desarrollado por el Ministerio de Vivienda del Ecuador (Miduvi). La disposición de esta tipología de viviendas en muy alta densidad, pareada por dos costados para lograr un máximo aprovechamiento del terreno. La distancia entre los frentes de las viviendas es de apenas cinco metros y con retiro posterior de tres metros. Esta disposición reduce la incidencia solar, además de problemas de visualidades y privacidad. En la Figura 3 (basada en documentos de la Emuvi EP) se aprecia la configuración de las viviendas. Si bien tiene aspectos de condiciones de diseño, en este trabajo se analiza la incidencia de la materialidad de la envolvente.

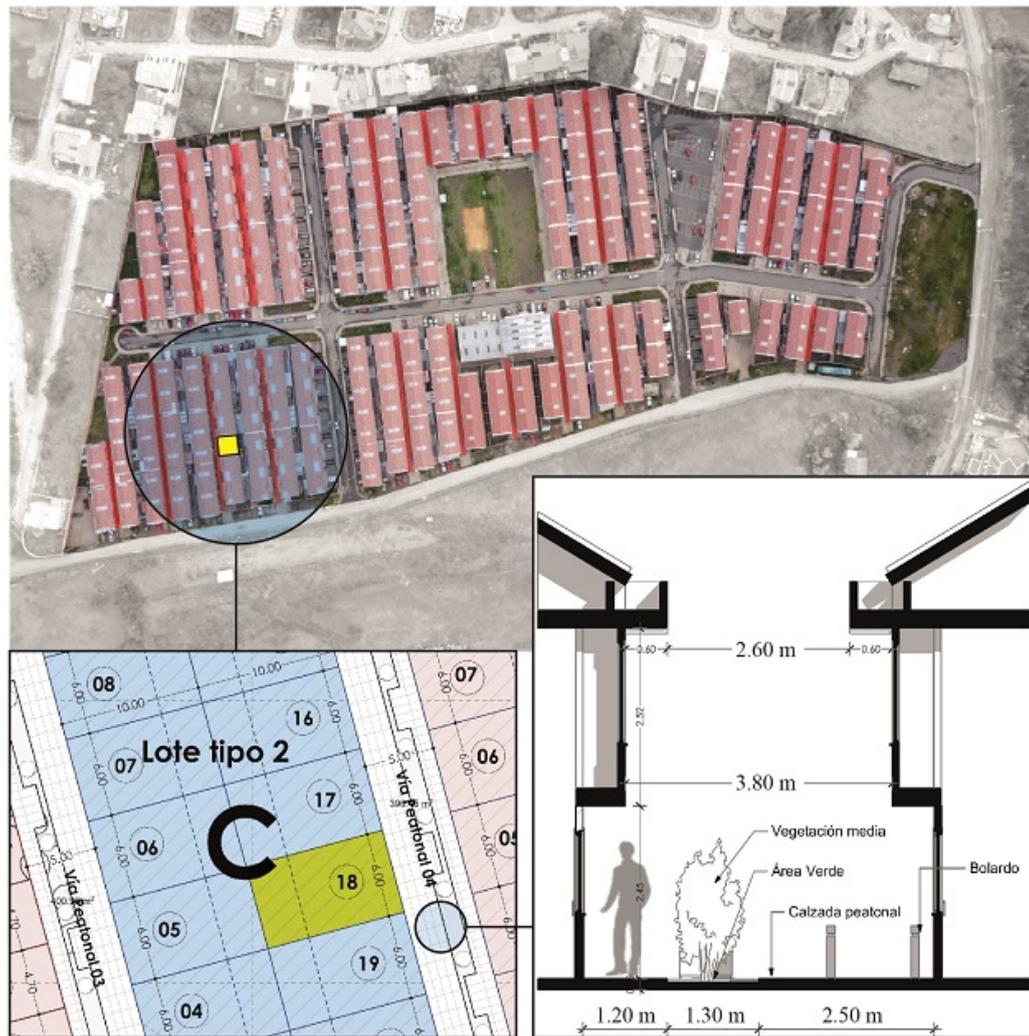


Figura 3. Vivienda de estudio junto a las demás dentro de la urbanización Los Capulíes

2. Materiales y métodos

En primera instancia, se establecieron los parámetros y características que influyen en el rendimiento energético y se analizan respecto a los niveles de confort térmico de la normativa que manda que la tempera-

tura interior debe mantenerse entre 18 y 26 °C [23]; considerando que excesos o déficit, se estaría fuera del rango de confort térmico. Con este precedente, se determinó los siguientes parámetros para el estudio del rendimiento energético:

Implantación. Se determina por la posición de la vivienda dentro de la manzana, conformando una vivienda esquinera, medianera y aislada. *Clima.* Se determina mediante archivo climatológico en la región de Cuenca. *Ganancias térmicas internas.* Se refiere a la cantidad de energía que aportan los aparatos eléctricos y los usuarios en materia de calor dentro de la vivienda. *Infiltraciones de aire.* Se hace referencia a los intercambios de aire por hora a una presión de 50 Pa, es decir, a los niveles de renovación de aire dentro de una vivienda. Estos parámetros se estudiarán en tres variaciones de la misma vivienda de acuerdo con la ubicación dentro de la manzana: aislada, medianera y esquinera.

Para el análisis se construyeron ochenta y cinco modelos desde variaciones virtuales de materialidad. Se considera a la temperatura operativa interior (TO) como la variable para los análisis de resultados, la temperatura exterior, bulbo seco (TE) representa únicamente a la temperatura que afecta a la envolvente de la vivienda y permite reflejar el nivel de acondicionamiento alcanzado por la vivienda. En cuanto a los niveles de infiltraciones de este tipo de estructuras, dado que no existen estudios locales, se toman indicadores encontrados en Chile [24]. En envolvente de mampostería se esperan niveles menores de infiltraciones de aire (10 ACH50) en comparación a los 25 ACH50 esperado en el LSF. Sin embargo, el LSF cuando se construye con mayor aislamiento, materiales de mejor comportamiento térmico y la calidad constructiva es alta, con énfasis en las juntas constructivas, los intercambios de aire disminuyen [25].

En una segunda instancia, se hicieron los modelos digitales de la vivienda unifamiliar a estudiar en dos grupos. Para el primer grupo se modelaron las configuraciones y materialidad recurrentes para la región, es decir, el sistema tradicional húmedo. En el segundo grupo se realizaron los modelos con el sistema LSF. Finalmente, en una tercera instancia se procedió al análisis del confort interior térmico de los dos sistemas constructivos.

Se estudiaron los modelos virtuales con los simuladores energéticos Design Builder [26] y Therm [27], alimentados por información climática de la zona de estudio del 2016. No se utilizó el archivo climático (.tmy) (clima promedio típico) porque ello implica que se pierdan días y horas con temperaturas extremas, por ello se emplean datos climáticos de un año (2016) en fichero epw.

La evaluación se realizó por etapas secuenciales por la interacción de diversos factores que intervienen en el confort interior térmico. La primera etapa busca determinar la incidencia de orientación, aspecto difuso en el clima ecuatorial. Previo al análisis de confort térmico de la vivienda, en la segunda etapa con Design Builder se plantea determinar el rendimiento energético de la vivienda con LSF sin incluir aislamiento térmico. El modelo es alimentado por coeficientes de envolvente desde análisis térmico desde la materialidad realizado en Therm, herramienta que permite determinar a detalle la capacidad aislante, considerando afectaciones que implica puentes térmicos. En la tercera etapa se busca conocer si existen mejoras en los niveles térmicos con aislamientos mínimos en el sistema LSF.

Finalmente, en la cuarta etapa, se busca mejorar los materiales utilizados en el sistema LSF a fin de conocer si el incremento térmico es significativo por lo que se utiliza nuevamente la herramienta Therm para analizar las configuraciones de las diferentes carpinterías.

La frecuencia de horas fuera de confort (FDT, por sus siglas en inglés) es el porcentaje de tiempo en el cual la temperatura operativa no alcanza los estándares requeridos [28]. Por lo tanto, en esta investigación, los resultados se analizarán porcentualmente referidos a un año en sus 8760 horas respectivas. Asimismo, en la instancia final, se establecerán los parámetros o variables de mayor a menor incidencia en el rendimiento térmico de la vivienda.

2.1. Características y materialidad originales de las viviendas de estudio

La vivienda de referencia es unifamiliar de dos plantas de 86,40 m², acorde con el INEC, una tipología recurrente en el país. Se trata de una vivienda de tamaño y condición promedio para albergar cuatro habitantes. La vivienda está materializada con estructura de acero, paredes de mampostería de ladrillo para la envolvente, únicamente con revoque hacia el interior y cubierta de fibrocemento con cielo falso de yeso paralelo al fibrocemento. El piso y entepiso es de hormigón con revestimiento porcelánico en áreas húmedas y piso flotante en ambientes secos. Finalmente, las carpinterías son de acero con vidrio simple. Con estas condiciones se simula la calidad térmica interior como base comparativa, en la Figura 4 se observa la vivienda de referencia.



Figura 4. Estado actual de la vivienda de estudio en 2020

La propuesta en LSF adopta las mismas condiciones del modelo base. Las dimensiones estructurales son provistas por el departamento de ingeniería de la empresa distribuidora local. Los componentes recomendados son los siguientes: Perfiles Stud (montantes) $90 \times 0,93$ mm en paredes y cerchas, Track (soleiras) de $90 \times 0,93$ mm en paredes y cerchas, Stud $200 \times 1,8$ mm en entrepiso y Track $200 \times 1,8$ mm en entrepiso. Sin embargo, la utilización y configu-

ración de las capas de aislamiento y materiales de revestimiento no están determinadas en función del rendimiento térmico debido al uso mínimo de esta tecnología a nivel nacional. Tanto los proveedores como los consumidores eligen los componentes y materiales basándose en diversos criterios para construir la vivienda. En la Figura 5 se muestran los planos de la vivienda adaptada al LSF.

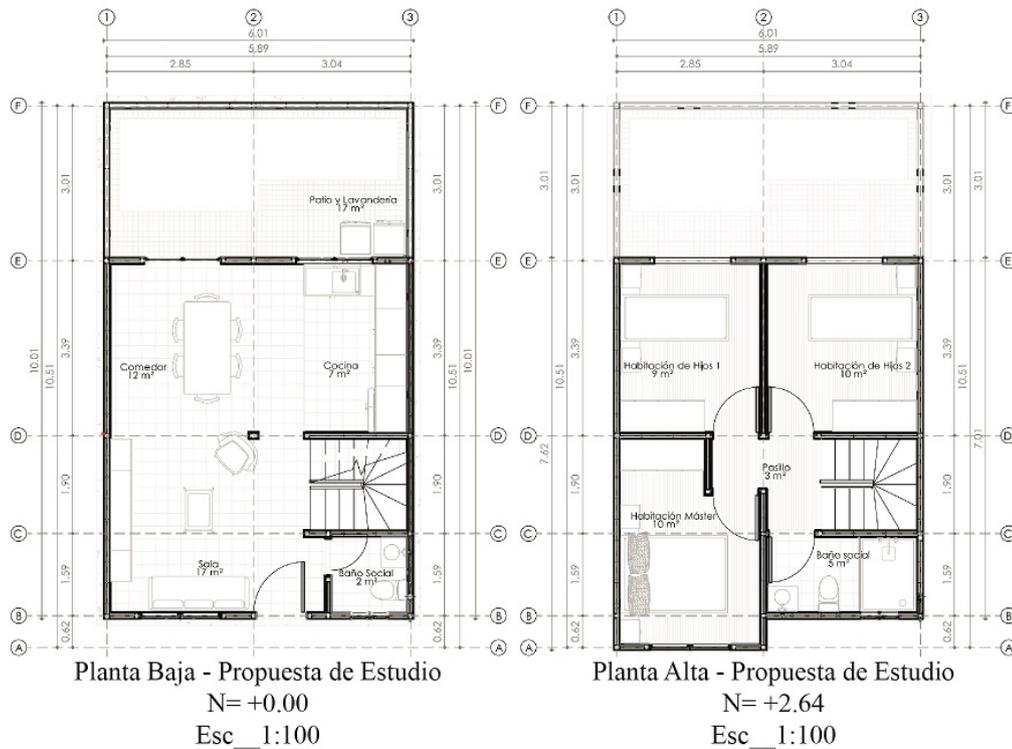


Figura 5. Propuesta materializada con LSF

2.2. Condiciones generales para el estudio del confort interior térmico

Se identifican los aspectos y características de la envolvente como datos de entrada para el análisis de confort

interior térmico y se establecen los parámetros para la evaluación digital categorizados en seis grupos (Tabla 1).

Tabla 1. Condiciones y parámetros generales

N.º	Parámetro	Código	Variables	Descripción de variable	Observaciones
1	Tipología de vivienda	V01	V. ladrillo medianera	Estado actual	Medianera
2		V02	V. ladrillo esquinera	Estado actual	Esquinera
3		V03	V. ladrillo aislada	Estado actual	Aislada
4		V04	V. LSF medianera	Propuesta	Medianera
5		V05	V. LSF esquinera	Propuesta	Esquinera
6		V06	V. LSF aislada	Propuesta	Aislada
7	Implantación	I01	Fachada actual este	Orientación de fachada principal	Estado actual
8		I02	Fachada actual oeste	Orientación de fachada principal	Estado actual
9		I03	Fachada norte	Orientación de fachada principal	Norte
10		I04	Fachada sur	Orientación de fachada principal	Sur
11		I05	Fachada este	Orientación de fachada principal	Este
12		I06	Fachada oeste	Orientación de fachada principal	Oeste
13	Clima	C01	Anual	Promedio anual	Promedio
14		C02	Mes más frío	Promedio mensual	Promedio
15		C03	Mes más cálido	Promedio mensual	Promedio
16		C04	Día más frío	Día anual más frío	Todo el día
17		C05	Día más cálido	Día anual más caliente	Todo el día
18	Ganancias internas	GI1	Usuarios	3.7	Promedio [29]
19		GI2	Aparatos y equipos	13.31 W/m ²	W/m ²
20	Infiltraciones de aire del sistema constructivo	SC1	10 en todas las etapas	Sistema mixto de ladrillo y acero	Fuente: [30]
21	(Niveles ACH a 50 Pa)	SC2	25 en la etapa 1 y 2, 10 en la etapa 3 y 7 en la etapa 4.	Sistema LSF	Fuente: [30]

3. Resultados y discusión

3.1. Primera etapa: Desempeño térmico base de la vivienda de referencia, estado actual

En la primera etapa se realizan veinte modelos digitales divididos en dos grupos según el sistema constructivo. El primer grupo analiza el sistema mixto de ladrillo en

estructura de acero de las viviendas en su implantación actual como situación base, el segundo grupo se enfoca al LSF. En la Tabla 2 se describen a detalle los parámetros de evaluación para todas las simulaciones, considerando niveles de infiltraciones en recambios de aire por hora (ACH) a 50 Pa de presión, bajo distintas orientaciones de la fachada frontal de acceso de la vivienda.

Tabla 2. Parámetro de variación en primera etapa

N.º	Sistema constructivo		Tipología de vivienda	Implantación		
	Tipo	Características				
E1_01	Sistema mixto de ladrillo y acero		Medianera	Este		
E1_02				Oeste		
E1_03	10 ACH50	Vivienda tradicional de mampostería	Esquinera	Este		
E1_04				Oeste		
E1_05			Norte			
E1_06			Sur			
E1_07			Este			
E1_08			Oeste			
E1_09			Sistema LSF		Medianera	Norte
E1_10						Sur
E1_11	25 ACH50	Vivienda con LSF sin aislamiento			Esquinera	Este
E1_12						Oeste
E1_13					Norte	
E1_14					Sur	
E1_15					Este	
E1_16					Oeste	
E1_17					Norte	
E1_18					Aislada	Sur
E1_19	Este					
E1_20	Oeste					

Los modelos con las orientaciones de las fachadas frontales y posteriores con las aperturas principales, puertas y ventanas se consideran como favorables cuando enfrentan al este y oeste (mayor incidencia solar) y desfavorables norte y sur (mínima incidencia de irradiación como consecuencia de la latitud ecuatorial). En la Figura 2 se demuestra la orientación predo-

minante de los vientos. Se encuentra que la variación térmica promedio es mínima por orientación como se observa en la Figura 6. Para la siguiente etapa se estudiará solamente con escenarios con las orientaciones desfavorables para visualizar los resultados en las temperaturas más extremas.

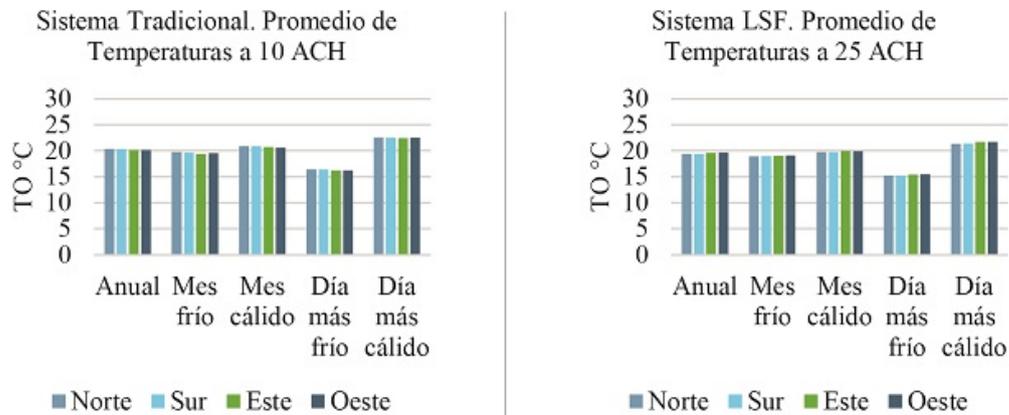


Figura 6. TO promedio en función del parámetro Implantación

3.1.1. Análisis del desempeño térmico de los sistemas constructivos a través de la sección de la envolvente mediante THERM

En este apartado se analiza la transmitancia térmica de cada material de la envolvente de los sistemas constructivos de estudio. Al sistema tradicional se le agrega los perfiles de acero que componen la estructura de toda la vivienda, mismos que quedan expuestos en

el modelo original. Asimismo, al LSF se lo considera con aislamiento sencillo de lana de roca de una sola capa con un espesor de 50 mm, con lo que queda una capa de aire remanente de 40 mm en la sección de la envolvente. La variable de estudio es la influencia de la estructura metálica en cada sistema constructivo. Se encuentra la influencia de los puentes térmicos en las viviendas. Se hacen los análisis en los casos más desfavorables de cada orientación como se observa en la Figura 7.

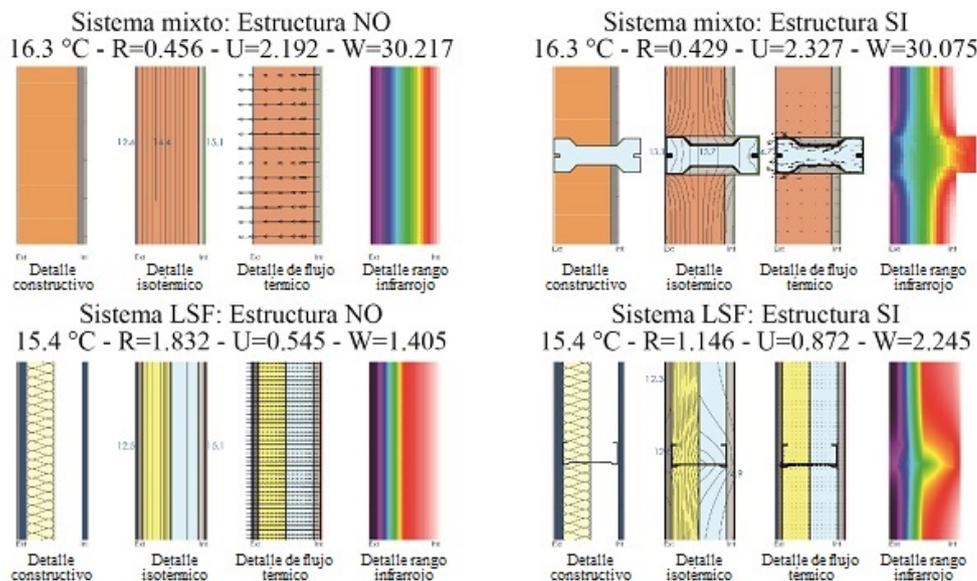


Figura 7. Análisis térmico de la sección de ambos sistemas constructivos en Therm y conductividad determinada

En todas las paredes de la envolvente se evidencia la transmitancia térmica en valores altos, los puentes térmicos son importantes en ambos sistemas constructivos, lo cual influye significativamente en la capacidad de aislamiento. En el sistema constructivo mixto de ladrillo en pórticos de acero se observan valores de

transmitancia térmica más altos en las zonas que concurren los elementos estructurales. No obstante, en el LSF, la transmitancia térmica se reparte y se mitiga por el revestimiento de fibrocemento y yeso-cartón.

3.2. Segunda etapa: Análisis térmico con incidencia de los puentes térmicos en orientaciones desfavorables

En esta etapa (Tabla 3) se configura nuevamente los modelos digitales en Design Builder ingresando en el simulador los nuevos valores del parámetro *Resistencia*

térmica o *Factor R* de cada material, valores reducidos a un 67,78 % del valor original de acuerdo con el estudio mediante Therm. Para este apartado se analizan nuevamente las viviendas con la condición del parámetro *Implantación*, en este caso referido a las orientaciones más desfavorables, es decir, sin incidencia solar directa en fachadas.

Tabla 3. Segunda etapa

N.º	Sistema constructivo		Tipología de vivienda	Orientación de fachada
	Tipo	Características		
E2_01	Sistema mixto de ladrillo y acero		Medianera	Norte
E2_02				Sur
E2_03	10 ACH50	Vivienda tradicional de mampostería	Esquinera	Norte
E2_04				Sur
E2_05				Norte
E2_06				Sur
E2_07	Sistema LSF		Medianera	Norte
E2_08				Sur
E2_09	25 ACH50	Vivienda con LSF sin aislamiento	Esquinera	Norte
E2_10				Sur
E2_11				Norte
E2_12				Sur

Con envolvente de ladrillo y acero, en el caso del día más frío la vivienda entra en confort únicamente al mediodía, mientras que, en el caso del día más cálido el confort se da en la mañana y en la tarde. Se observa un importante pico en temperaturas altas al mediodía.

En consecuencia, la vivienda sufre sobrecalentamiento, ya que no disponen de aislamiento en la cubierta y sobrecalentamiento en segunda planta como se observa en la Figura 8.

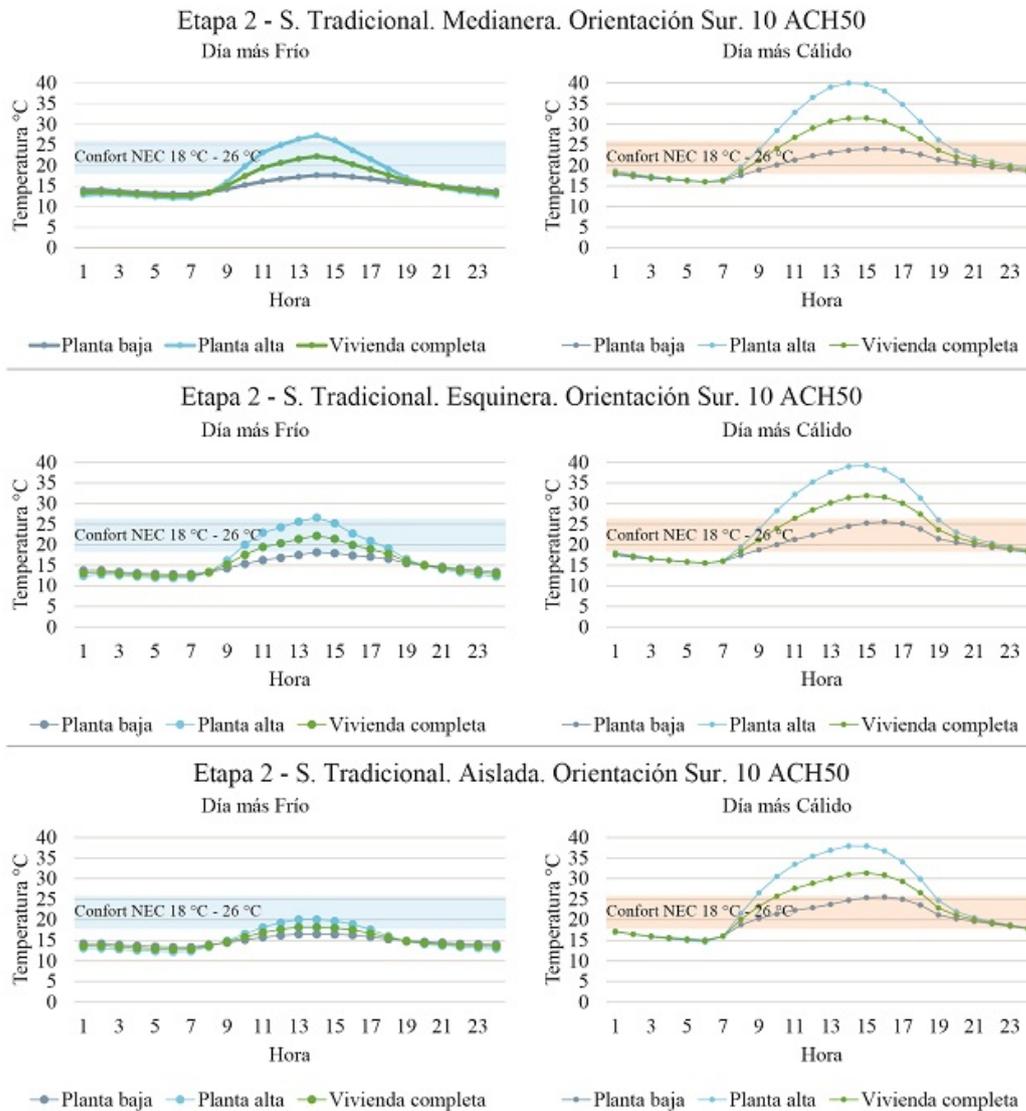


Figura 8. Comparativa térmica, sistema tradicional, segunda etapa

En el LSF, en el día más frío, existe confort luego del mediodía. Sin embargo, en el día más cálido el confort se extiende casi todo el día. Se observa que la curva térmica tiende a reducir la oscilación durante

las 24 horas del día. Los picos máximos y mínimos son menos pronunciados que el sistema de referencia como se observa en la Figura 9. En la Figura 10 se muestra la comparación térmica general de la segunda etapa.

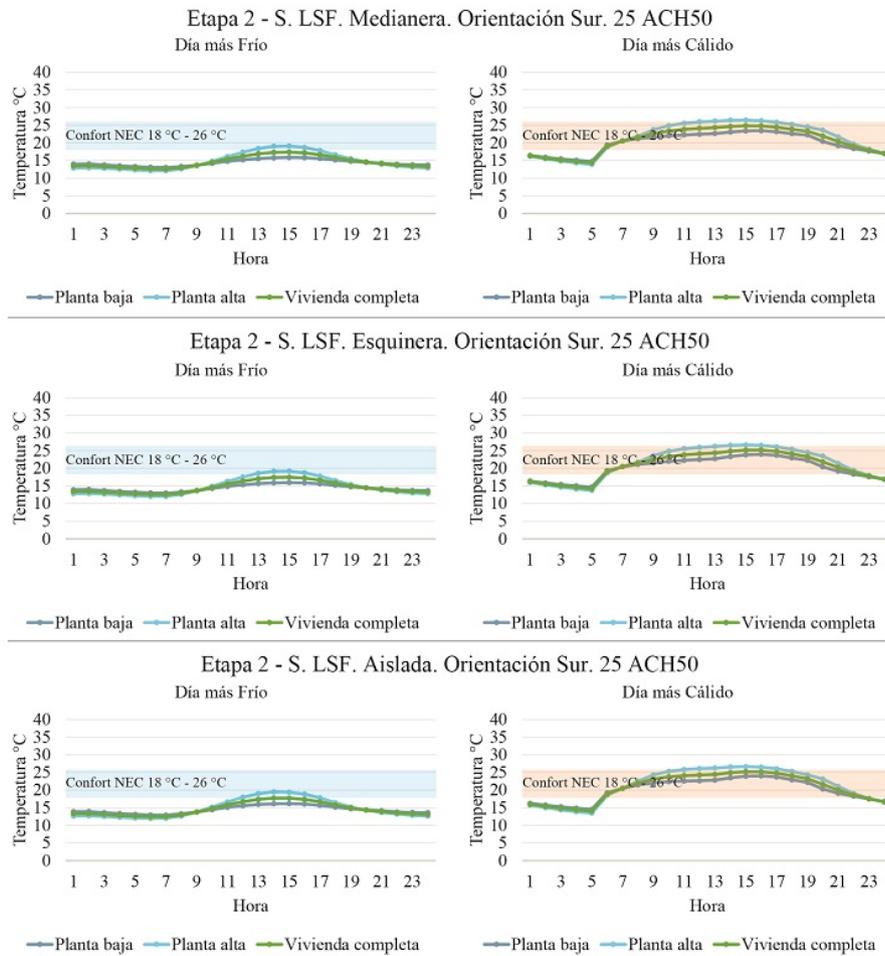


Figura 9. Comparativa térmica, sistema LSF, segunda etapa

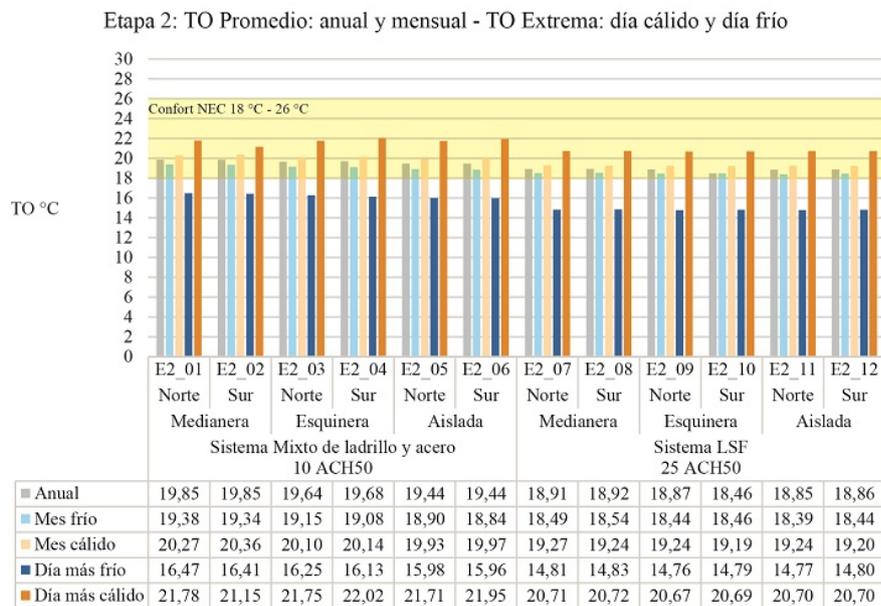


Figura 10. Comparativa térmica general de la segunda etapa

3.2.1. Análisis de las diferentes inclusiones de aislamiento térmico en las viviendas con LSF

Para las características climáticas de la Región Andina del Ecuador se utiliza en el análisis del LSF

la tipología «pared fría» [9] como se observa en la Figura 11 (basado en [9]). Esta tipología de pared con el aislamiento hacia la cara interna retiene mejor el calor en el interior de acuerdo con el análisis con Therm. Además, es la más sencilla y económica.

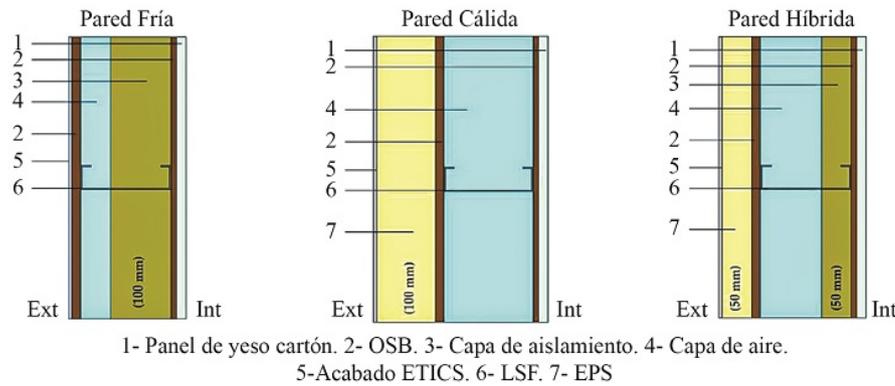


Figura 11. Tipologías de pared: cálida, fría e híbrida

Se analiza también la incidencia de las infiltraciones estimada para la tipología constructiva, que acorde con el sistema constructivo se ha considerado un ACH50 de 25, a partir de ello desempeño térmico de la vivienda consecuente. La vivienda base (A01) muestra el peor desempeño en promedio. Los casos A02 y A03 (A03, aislamiento interior recomendado por condiciones acústicas) resultan similares. Sin embargo, la vivienda A03 debido a una mejor configuración de las superficies aisladas térmicamente de manera más uniforme en la envolvente, implica una vivienda más hermética. La cámara de aire que se produce entre la cubierta y el cielo falso de la planta alta brinda mejores resultados

respecto a la configuración base, considerando que estas viviendas actualmente no se construyen con cielo falso y, menos aún, con aislamiento, siendo habitual el sobrecalentamiento en los momentos de presencia de irradiación directa ecuatorial, así como las pérdidas térmicas importantes en las noches. Los casos A04 y A05 se observan son críticos respecto a los anteriores. Esto significa que el aislamiento en la cubierta en mayor medida y menor medida en el suelo es necesario. Los resultados se contabilizan de las 24 horas del día, únicamente a todas las horas que alcanzan el rango de confort NEC (18 y 26 °C) como se observa en la Figura 12.

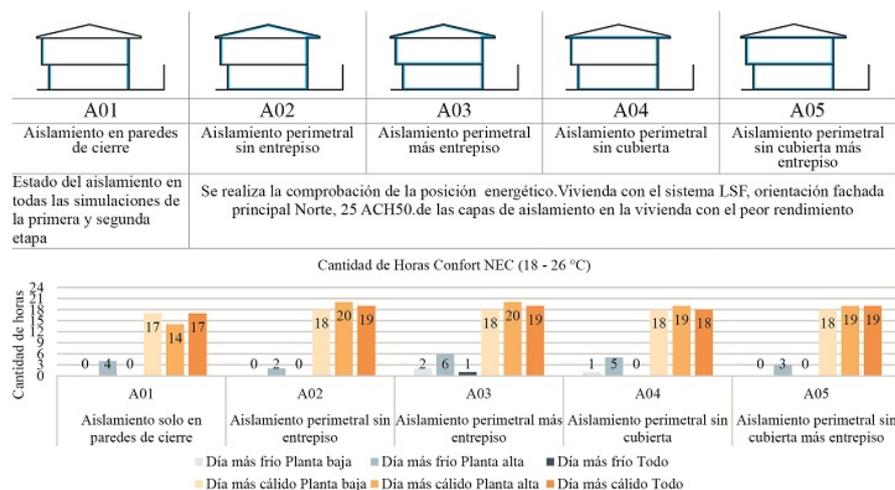


Figura 12. Tipos de aislamiento y rendimiento energético en número de horas confort

3.2.2. Análisis del rendimiento energético de las diferentes configuraciones de carpinterías mediante Therm

Se analizan también puentes térmicos en las carpinterías, en la Tabla 4 se presentan los casos a estudiarse. Simulando únicamente los paneles de vidrio sin la influencia de una carpintería, la capacidad de aislamiento

del panel de vidrio doble (C14) es consistentemente más elevada en comparación al panel de vidrio simple (C13). Por lo tanto, una ventana con vidrio doble y cámara de aire es una mejora. En cuanto a materiales de la carpintería, la madera o PVC son alternativas adecuadas con buenas características aislantes como se observa en la Figura 13.

Tabla 4. Simulaciones de carpinterías

N.º	Tipo	Material	Condición climática	Configuración de paneles de vidrio	Observaciones
C01	Ventana	Aluminio	Día caliente	simple	Corrediza.
C02			Día frío	doble	Perfiles
C03			Día caliente	simple	comerciales
C04			Día frío	doble	estándar
C05	Ventana	Madera	Día caliente	simple	Corrediza.
C06			Día frío	doble	Carpintería
C07			Día caliente	simple	artesanal
C08			Día frío	doble	
C09	Ventana	PVC	Día caliente	simple	Corrediza.
C10			Día frío	doble	Perfiles
C11			Día caliente	simple	comerciales
C12			Día frío	doble	estándar
C13	Ninguna	Vidrio	Indiferente	simple	Exclusivo, paneles
C14				doble	de vidrio
C15	Puerta	Madera	Día caliente	simple	Puerta con hoja
C16			Día frío	simple	simple de madera MDF
C17	Puerta	Acero	Día caliente	simple	Puerta con hoja
C18			Día frío	simple	simple de chapa de acero

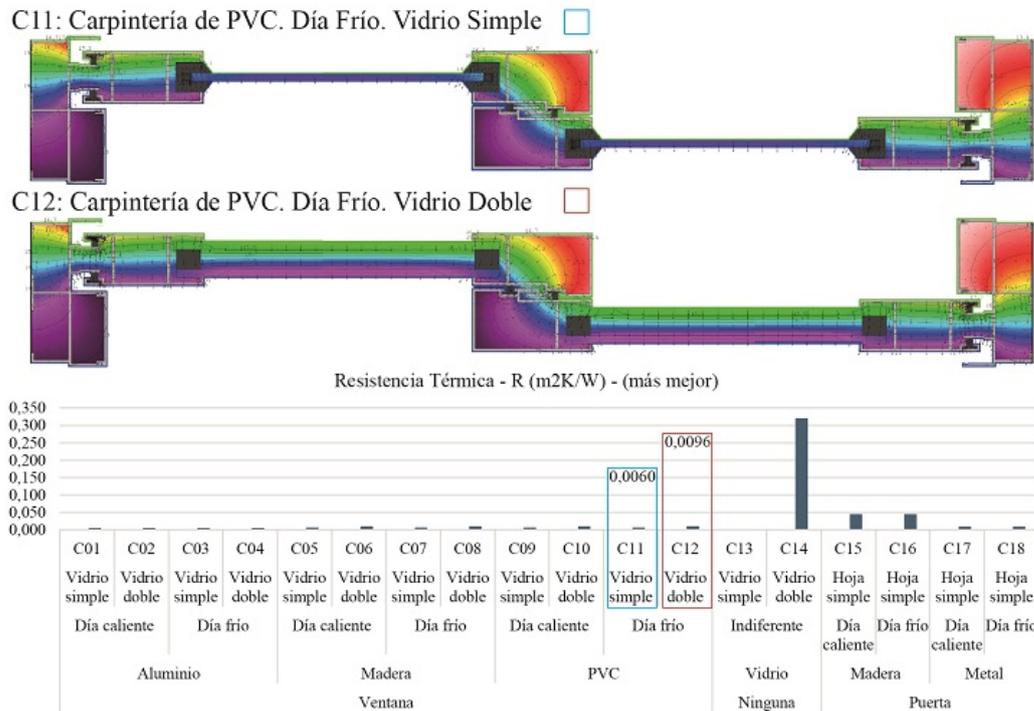


Figura 13. Resultados de carpinterías en día de extremo frío

3.3. Tercera etapa: Análisis térmico de vivienda en materialidad tradicional frente a vivienda con LSF con aislamiento

En esta etapa desde simulaciones se revisa la temperatura interior en condiciones de uso normal. Además, la implantación con las orientaciones; favorable (este) y desfavorable (sur). En el caso del LSF con las varia-

ciones siguientes: Configuración de aislamientos, infiltraciones de aire menores y carpinterías. En la Tabla 5 se muestran las simulaciones. La vivienda con LSF utiliza la solución de la simulación A03 (aislamiento perimetral más entrepiso). Por ende, el nivel de infiltraciones de aire disminuye de 25 a 10 ACH50, dato tomado de estudio de [30].

Tabla 5. Condiciones para la etapa 3 de simulaciones

N.º	Sistema constructivo		Tipología de vivienda	Orientación de fachada frontal
	Tipo	Características		
E3_01	Sistema mixto: ladrillo y acero		Medianera	Sur
E3_02		Vivienda		Este
E3_03	10 ACH50	tradicional de mampostería	Esquinera	Sur
E3_04				Este
E3_05	3,7 usuarios		Aislada	Sur
E3_06	13,31 W/m2			Este
E3_07	Sistema LSF		Medianera	Sur
E3_08		Construcción estándar LSF.		Este
E3_09	10 ACH50	Aislamiento térmico de la envolvente: EPS en losa, lana de roca de 50 mm en paredes, entrepisos y cubierta.	Esquinera	Sur
E3_10				Este
E3_11	3,7 usuarios		Aislada	Sur
E3_12	13,31 W/m2			Este

El resultado general de cada simulación indica mejores niveles térmicos mejores para ambos sistemas constructivos. Sin embargo, cabe destacar que se han incluido las ganancias térmicas. De tal manera, estos son los niveles térmicos de la vivienda con sistema

tradicional para el uso diario de sus ocupantes. En el caso del sistema LSF los valores son mucho mejores como se observa en la Figura 14. En cuanto al número de horas confort en la Figura 15 se muestran los resultados detallados.

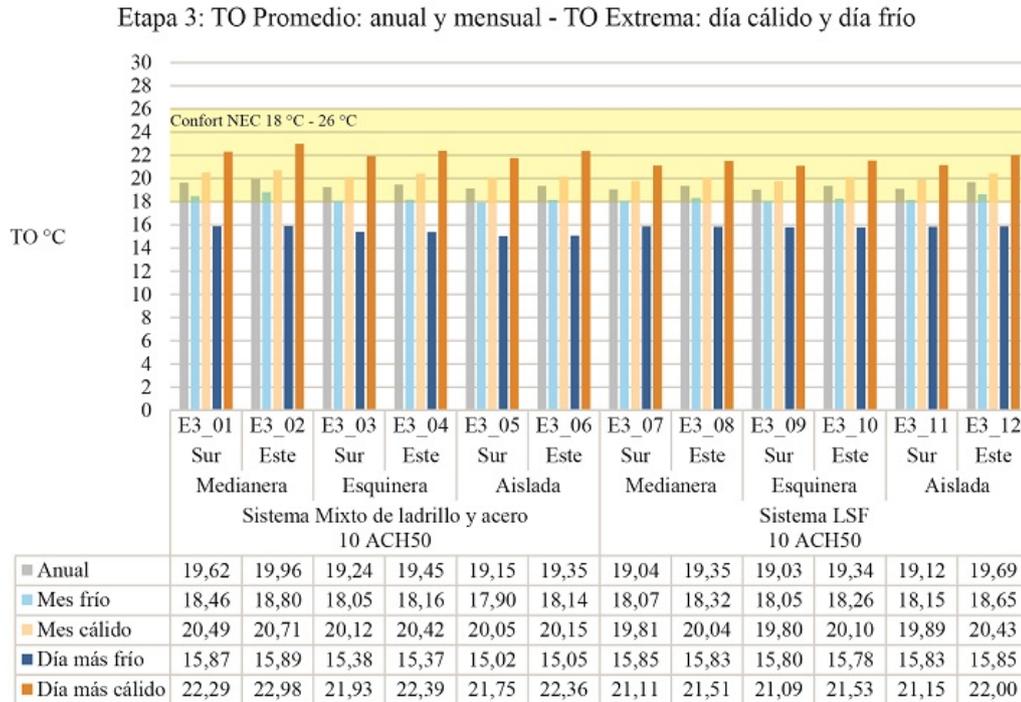


Figura 14. Comparativa térmica general de la tercera etapa

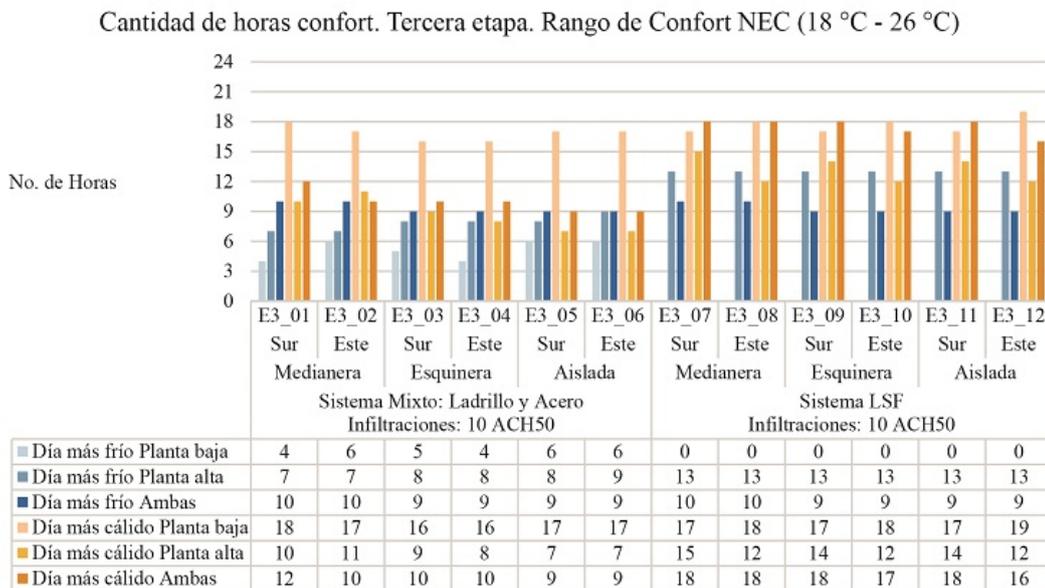


Figura 15. Comparativa del número de horas confort de la tercera etapa

Comparando los niveles térmicos de esta simulación con la etapa anterior, en los casos más extremos, se tienen: en el sistema tradicional, en estado actual, la vivienda muestra en el día frío un 38 % del tiempo niveles de confort interior térmico adecuado, en la noche y la madrugada se dan bajas temperaturas. El

día más caliente se eleva mínimamente a un 42 % de tiempo dentro del rango de confort, observándose sobrecalentamiento desde las 10:00 hasta las 18:00, consecuencia, sobre todo, de la mínima capacidad aislante de la cubierta como se observa en la Figura 16.

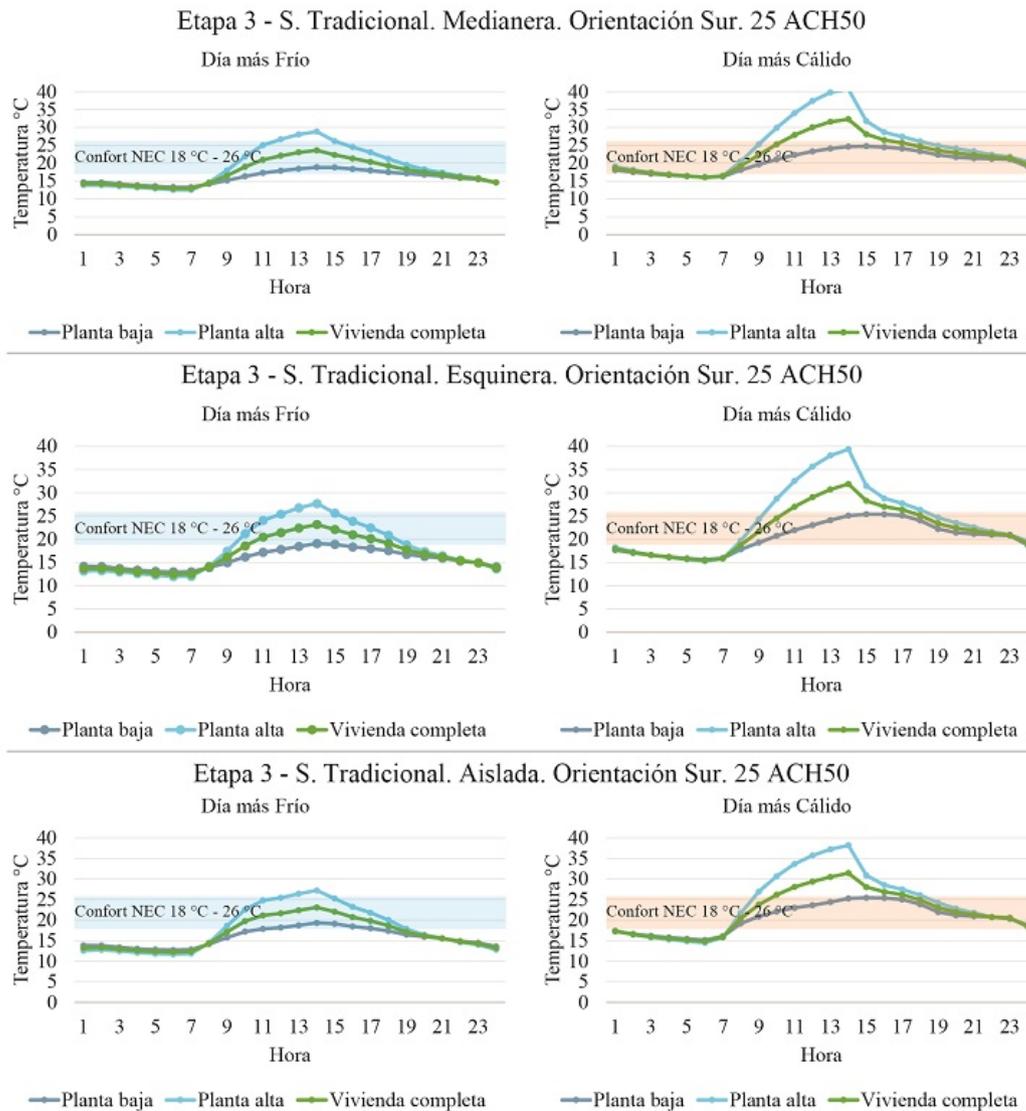


Figura 16. Comparativa térmica, sistema tradicional, tercera etapa

En el sistema LSF, con características de construcción estándar establecidas en la Tabla 5, la vivienda en el día llega a un 38 % de confort interior térmico con valores entre los 13,47 °C y 19,52 °C. En el escenario de día de mayor temperatura, la vivienda llega a un 67 % de horas de confort interior térmico con un rango

de temperaturas entre los 16,53 °C y 26,89 °C. En el día más frío y el día más caliente, en ambos sistemas constructivos, el porcentaje de horas confort diarias prácticamente no supera el 50 % como se observa en la Figura 17.

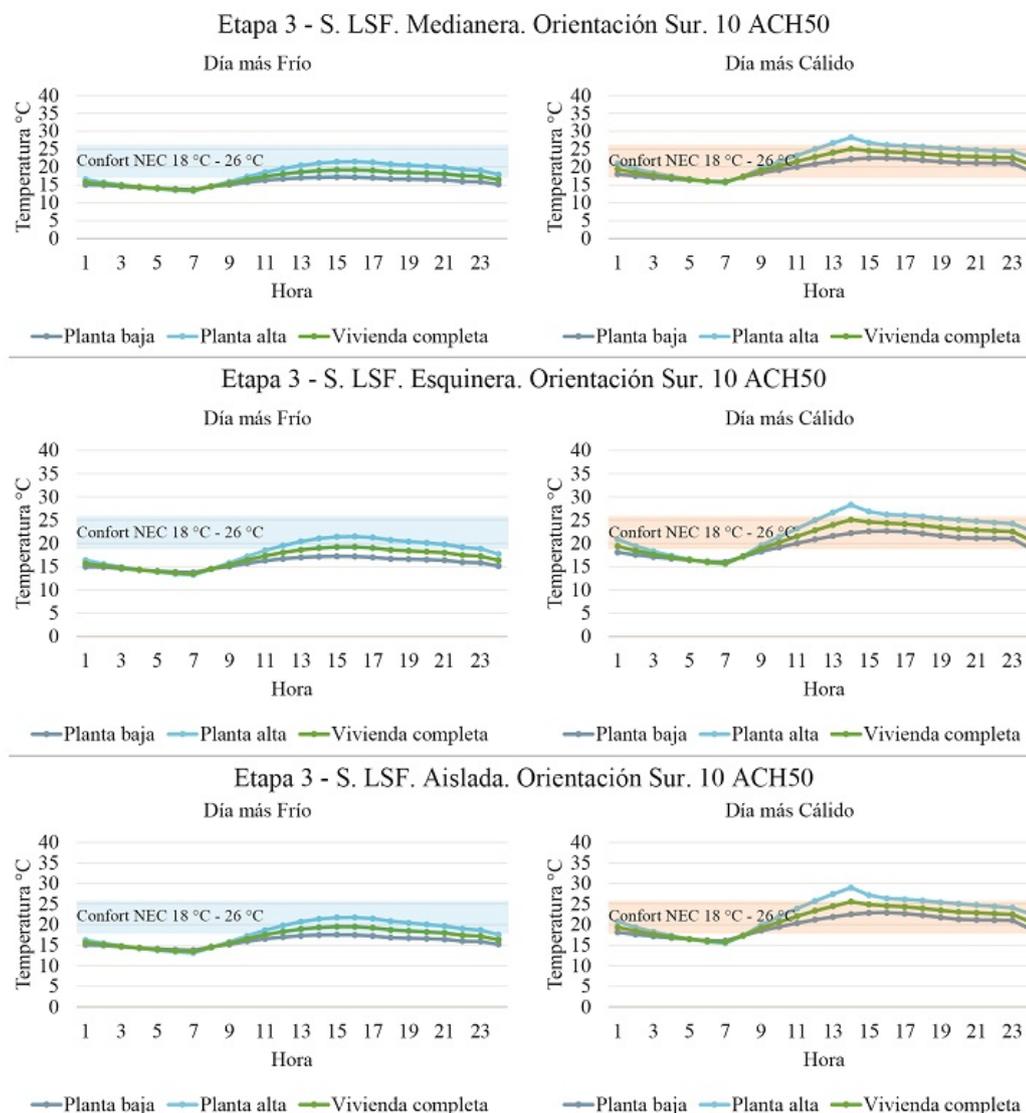


Figura 17. Comparativa térmica, sistema LSF, tercera etapa

3.4. Cuarta etapa: Análisis de la vivienda con LSF con las características de construcción recomendadas con énfasis en la calidad constructiva e infiltraciones de aire

Una vez conocido el rendimiento real de la vivienda de referencia con sistema constructivo de mampostería y estructura de acero (tercera etapa), se analiza respecto al sistema LSF midiendo la posibilidad de incrementar las horas de confort anuales adaptando el

sistema a mejorar la calidad constructiva y la hermeticidad de la vivienda con estrategias de construcción de alto rendimiento (Tabla 6). En esta etapa se supone un ajuste en la envolvente para reducir infiltraciones suponiendo alcanzar 7 de ACH50 (Tabla 6). Se ha establecido en estudios previos con LSF y entramado de madera un valor alcanzable de 7,47 ACH50 [31]. Paralelamente, la (International Energy Conservation Code, 2009 IECC) dispone un valor de 7 ACH50.

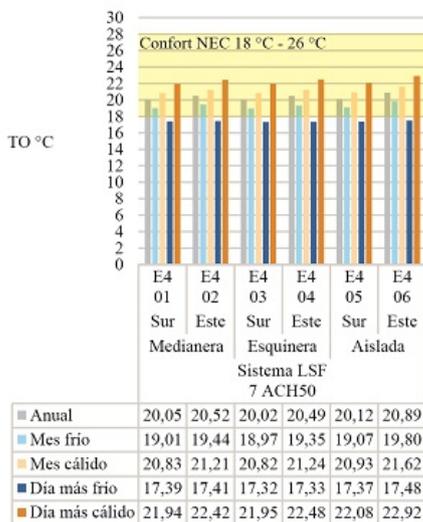
Tabla 6. Condiciones para la etapa 4 de simulaciones

No.	Sistema constructivo		Tipología de vivienda	Orientación de fachada de acceso
	Tipo + ACH	Características		
E4_01	Sistema LSF	Construcción de alto	Medianera	Sur
E4_02		aislamiento. Aislamiento		Este
E4_03	7 ACH50	térmico de la envolvente: EPS	Esquinera	Sur
E4_04		en losa, lana de roca de 50 mm		Este
E4_05	3,7 usuarios	en paredes, entrepisos	Aislada	Sur
E4_06	13,31 W/m ²	y cubierta.		Este

Los resultados señalan que para el día más frío, como se observa en las Figuras 18 y 19, los valores de la temperatura operativa (TO) oscilan entre los 15,92 y 18,55 °C. Las diferencias entre los valores máximos y mínimos son menores. En consecuencia, se encuentra que las fluctuaciones son menores. El incremento de horas de confort, con respecto a la etapa anterior, pasa de un 38 a un 46 % con infiltraciones de 7 ACH50 con ventanas de vidrio doble. En el análisis del día más cálido, los valores de la temperatura operativa se

encuentran entre los 20,53 y 25,77 °C. La diferencia de los valores térmicos entre máximos y mínimos es considerablemente menor al de la vivienda de referencia. El incremento de horas de confort, con respecto a la etapa anterior, pasa de 67 a 100 %. En el día más cálido se observa sobrecalentamiento en la hora de incidencia solar directa, lo cual se puede contrarrestar con ventilación natural dada la temperatura exterior más baja.

Etapa 4: TO Promedio: anual y mensual
TO Extrema: día cálido y día frío



Cantidad de horas confort. Cuarta etapa. Rango de Confort NEC (18 °C - 26 °C)

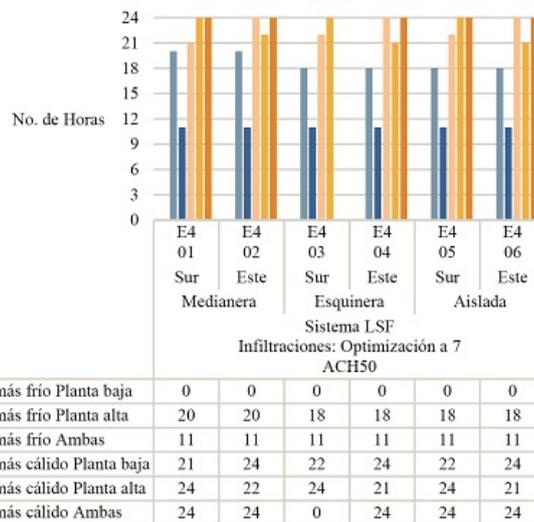


Figura 18. Comparativa térmica y del número de horas confort de la cuarta etapa

En la Figura 19 se muestra a la vivienda con LSF, en todas las orientaciones, donde se aprecia que la curva térmica oscila menos a lo largo del día. Las variaciones térmicas no son tan pronunciadas como se evidencia en las etapas anteriores. Con estrategias

de construcción recomendadas, atendiendo a la materialidad con el objetivo de disminuir los niveles de intercambios de ACH, la vivienda se comporta térmicamente más estable en la temperatura sin la necesidad de recurrir a sistemas de calefacción activos.

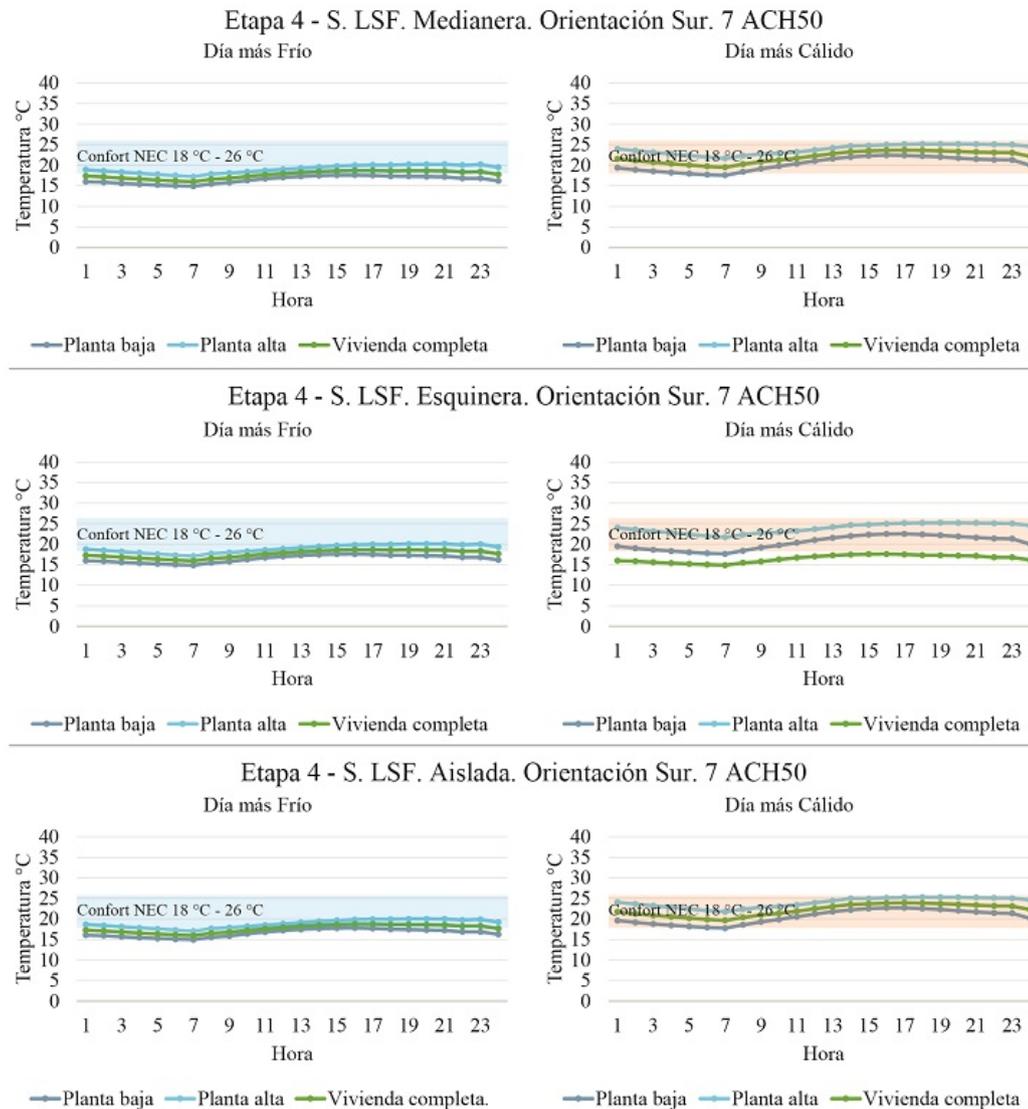


Figura 19. Comparativa térmica, sistema LSF, cuarta etapa

3.5. Discusión

En la primera etapa se determina únicamente el resultado más favorable y más desfavorable en cuanto a la orientación de las viviendas. La orientación de la fachada principal con los vanos de puertas y ventanas hacia el este y oeste es mejor en cuanto al rendimiento energético. Sin embargo, la variación térmica no es considerablemente menor en la orientación norte-sur debido a las dimensiones de la vivienda.

En la segunda etapa en la vivienda de referencia se observan los resultados de las orientaciones desfavorables (norte-sur) donde se alcanza un confort interior térmico en solamente el 27 % de horas de todo el año. La vivienda con LSF, sin aislamientos en contrapiso y cielos rasos, siempre en las mismas orientaciones, se alcanza un confort interior térmico en el 42 % del tiempo.

En la tercera etapa las viviendas en su estado actual, el porcentaje promedio (bajo todas las orientaciones) de horas de un año que están en confort interior térmico es de un 51 %. Esto ocurre, principalmente, por la estructura de acero expuesta tanto al interior como al exterior, y por las importantes pérdidas en la cubierta sin cielo falso. Además, las puertas y ventanas típicamente metálicas, implican también puentes térmicos considerables. Las viviendas con LSF con estrategias de optimización estándar a 10 ACH50, mejora a un 62 % las horas de tiempo fuera de confort respecto a la vivienda base.

En la Etapa 4, en las Figuras 20 y 21, las viviendas con LSF con estrategias de optimización alta e infiltraciones en 7 ACH50, el porcentaje de tiempo confort es del 86 % del tiempo.

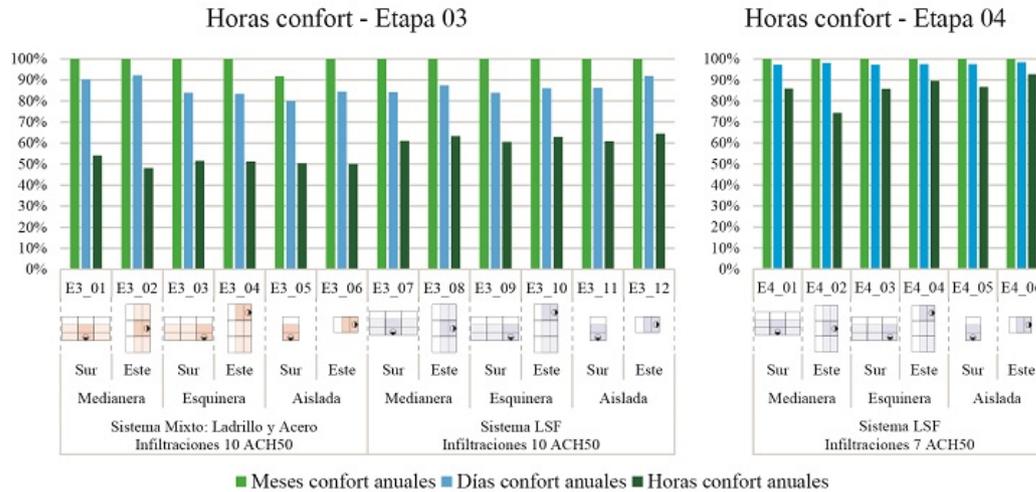


Figura 20. Comparativa de la cantidad de horas confort

Los resultados indican que la vivienda de referencia con sistema constructivo tradicional, posee una temperatura mínima promedio de 15,38 °C y máxima promedio de 27,68 °C, ambas fuera del rango de confort NEC. Sin embargo, cuando la vivienda tiene la envolvente en LSF con estrategias de optimización estándar con características y materiales de aislamiento básicos, la temperatura promedio mínima mejora levemente a 15,55 °C, sin alcanzar el mínimo de la norma y la temperatura promedio máxima es de 26,38 °C, levemente por encima del máximo normado. Finalmente, la vivienda con LSF con estrategias de optimización alta, características que según el análisis son las recomendadas, la temperatura mínima promedio es de 17,19 °C, cercana

a los 18 °C normados y no se registran temperaturas que superen los 26 °C. Se encuentra, finalmente, que el parámetro de mayor incidencia térmica es el control de infiltraciones de aire.

A continuación, en la Figura 21 se muestra un cuadro comparativo promedio de las tres tipologías de vivienda en un solo valor promedio mensual, diario y horario. De tal manera, se muestran los resultados en función del porcentaje del tiempo promedio en el cual las viviendas se encuentran en confort. Se realizan los valores promedio, ya que se demostró en cada una de las etapas que la variación térmica de las tipologías de vivienda es mínima, sin superar 1 °C en la mayoría de los casos.

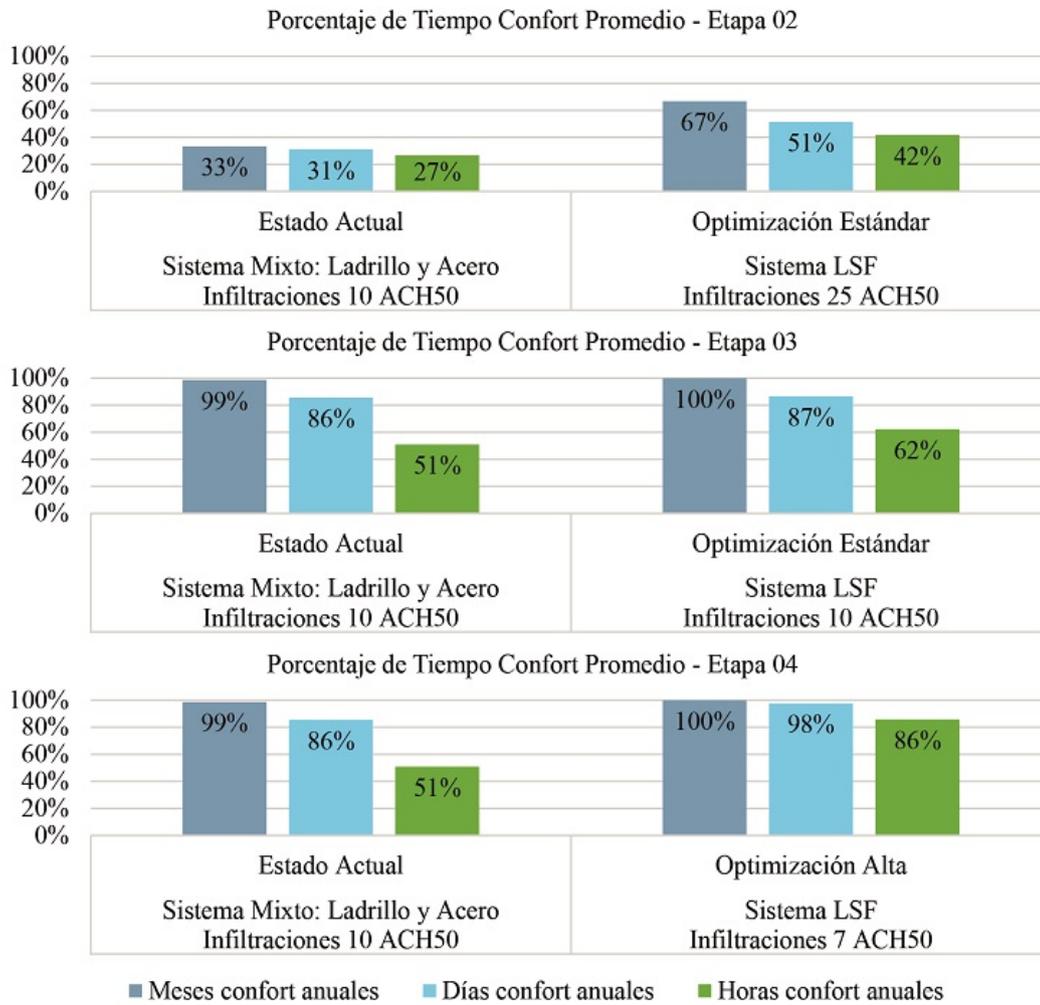


Figura 21. Comparativa de la cantidad de horas confort de todas las etapas

Se evidencia que las dimensiones de la sección en LSF planteados según el análisis estructural son más que suficientes para integrar el aislamiento necesario: 50 mm en lana de roca ubicado entre los studs apegado hacia el lado exterior dejando una cámara de aire de 50 mm entre los studs, en esquema de pared fría.

Luego, los otros parámetros analizados en importancia van desde las infiltraciones de aire, luego materiales de las carpinterías y, en menor medida, la orientación. A continuación, se indica un esquema de la vivienda recomendada con el nuevo sistema LSF para la región andina como se observa en la Figura 22.

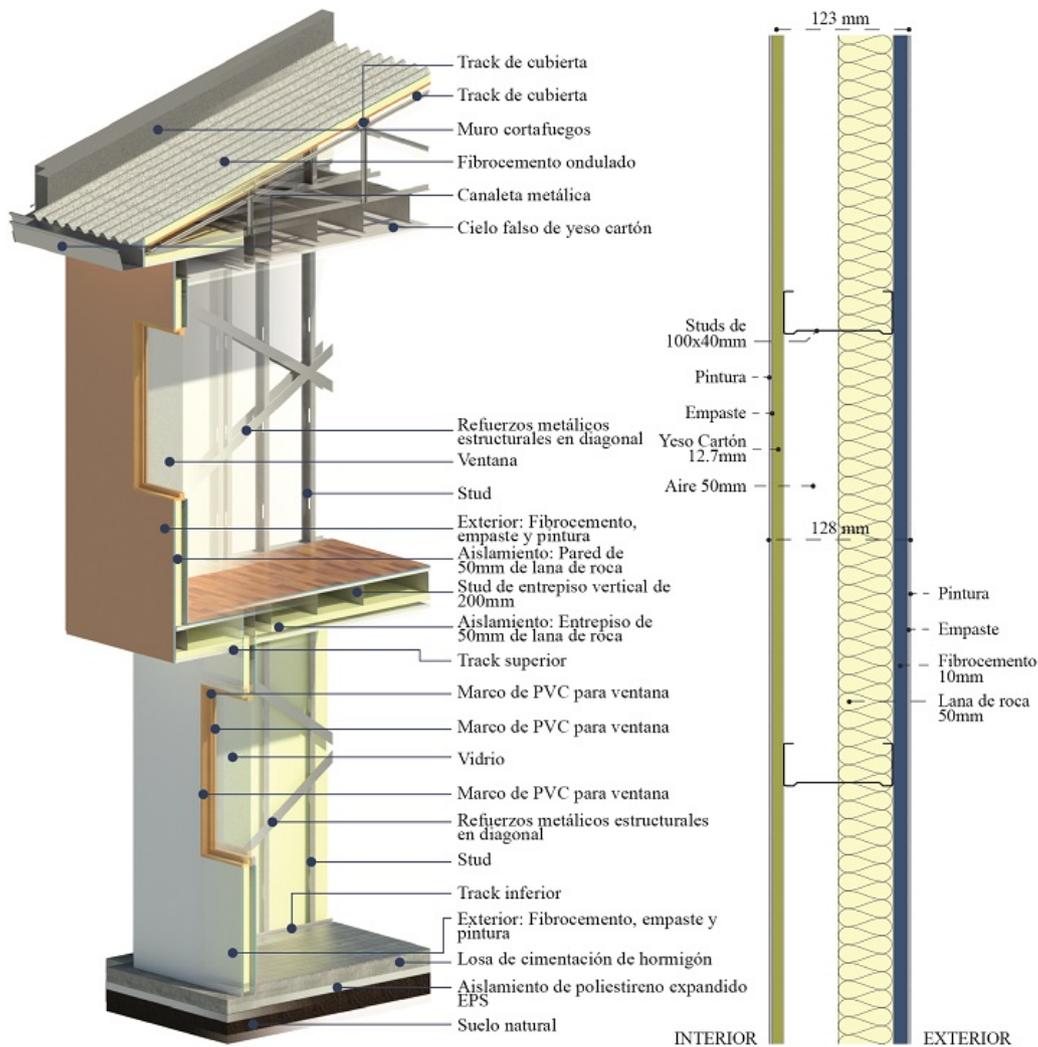


Figura 22. Esquema de la propuesta de la vivienda materializada con LSF

4. Conclusiones

Este trabajo realiza un análisis con simuladores ampliamente validados para detectar condiciones y desfases de confort de viviendas al cambiar y modificar tanto el sistema constructivo como los parámetros de confort. Una vez analizada la modificación de la envolvente desde el sistema tradicional constructivo en acero con envolvente de ladrillo, se revisa las implicancias de la modificación de la envolvente y de otros parámetros como orientación, infiltración y material de carpinterías. Si bien son simulaciones, es el modo más rápido para poder ver los diversos parámetros en igualdad de circunstancias con las modificaciones requeridas.

Los niveles de confort de las viviendas materializadas en LSF alcanzan niveles superiores a la vivienda de referencia edificada con el sistema constructivo mixto de mampostería de ladrillo y estructura en pórticos de acero (metodología de construcción tradicional). Con el cambio de sistema constructivo se incrementa

en un 11 % las horas de confort de la vivienda, pero con trabajo en hermeticidad, cambio de material en carpinterías, aislamiento en losas, entresijos y cielos se alcanza un 35 % más de horas dentro del rango de confort. Si bien, el bloque de ladrillo como material de envolvente tiene mejor inercia térmica, el LSF alcanza niveles apropiados de la envolvente, incluso en configuración sencilla en muro tipo sandwich.

Las variables más importantes para el desempeño ambiental, según este estudio, en orden de mayor a menor influencia térmica son aislamiento en cubierta, entresijos y losa de cimentación. Los resultados indican que con aislamientos horizontales el porcentaje de confort se incrementa del 42 al 62 %. Luego, el parámetro de infiltraciones de aire a través de hermeticidad, el confort térmico se incrementa de 62 a 86 %. En tercer lugar, la materialidad de la vivienda en general, en conjunto con el tipo de carpinterías, la mejora de un sistema ante el otro va del 51 al 86 %. Las variables con menor incidencia obedecen a la implantación y

tipología de viviendas. Estos factores se deben a la configuración de las viviendas y al tamaño de las mismas, ya que las dimensiones no son cuantiosas. La orientación, normalmente, factor de gran incidencia térmica en las otras latitudes para las localidades ecuatoriales el recorrido solar provoca que la incidencia de irradiación dure pocas horas.

Los resultados de los análisis por orientación son, en promedio, en la temperatura interna, apenas 1 °C superiores a la orientación norte-sur, incluso bien orientadas reciben poca radiación solar directa en las fachadas debido a la separación mínima entre viviendas, por condiciones de agrupación.

Una vivienda en la ciudad de Cuenca con garantías de habitabilidad dentro del rango de confort térmico entre 18 °C y 26 °C es factible con la alternativa de materialidad propuesta. En consecuencia, es adaptable para varias ciudades de Colombia, Ecuador y Perú que se encuentran en condiciones de ecuatorianidad con una altura cercana a los 2500 m s. n. m. Sin embargo, para climas más extremos es necesario revisar la adaptabilidad de la envolvente.

Con el cambio de materialidad no solo se busca generar viviendas que sean confortables para los usuarios finales, sino que también, como indican las fuentes consultadas, se busca reducir el impacto ambiental y ecológico que genera la industria de la construcción, en su mayoría con procesos artesanales, muchos sin control, evitando desperdicios innecesarios, ahorrando recursos que son cada vez más escasos antes, durante y después de la construcción.

Referencias

- [1] V. Arengo Piragine, J. Cruz Breard, and C. Pilar, “Anteproyecto de viviendas sociales con *steel framing* en Corrientes. Comparación con sistema húmedo tradicional,” *Arquitecto*, no. 15, p. 37, 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.30972/arq.0154386>
- [2] A. O. Venegas Tomalá, “Evaluación de la energía contenida, emisiones de CO₂ y material particulado en la fabricación del ladrillo semimecanizado tochano en Cuenca, a través del análisis de ciclo de vida (ACV),” Universidad de Cuenca, Ecuador, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Soq1IU>
- [3] M. T. Baquero L. and F. Quesada M., “Eficiencia energética en el sector residencial de la ciudad de Cuenca, Ecuador,” *Maskana*, vol. 7, no. 2, pp. 147–165, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18537/mskn.07.02.11>
- [4] M. Manzan, E. Zandegiacomo De Zorzi, and W. Lorenzi, “Numerical simulation and sensitivity analysis of a steel framed internal insulation system,” *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 1703–1710, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.069>
- [5] M. Bernardes, S. G. Nilsson, M. S. Martins, and A. Romanini, “Comparativo econômico da aplicação do sistema light steel framing em habitação de interesse social,” *Revista de Arquitetura IMED*, vol. 1, no. 1, pp. 31–40, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18256/2318-1109/arqimed.v1n1p31-40>
- [6] L. M. Lupan, D. L. Manea, and L. M. Moga, “Improving thermal performance of the wall panels using slotted steel stud framing,” *Procedia Technology*, vol. 22, pp. 351–357, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.108>
- [7] INEC. (2017) Encuesta de edificaciones 2017. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador. [Online]. Available: <https://bit.ly/3NsvnyW>
- [8] MIDUVI, “NEC-11. vivienda de hasta 2 pisos con luces de hasta 4.0 m,” Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. República del Ecuador, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3HU0uCk>
- [9] E. Roque and P. Santos, “The effectiveness of thermal insulation in lightweight steel-framed walls with respect to its position,” *Buildings*, vol. 7, no. 1, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/buildings7010013>
- [10] A. M. Sarmanho Freitas and R. C. Moraes de Crasto, *Steel Framing: Arquitectura*. Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero - ILAFA, 2007. [Online]. Available: <https://bit.ly/3QOMYUy>
- [11] J. L. Lamus Rodríguez, “Análisis de viabilidad económica: sistema constructivo *light steel framing* en Colombia,” Master’s thesis, Universidad de los Andes. Colombia, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3HRQfhU>
- [12] E. Rodrigues, N. Soares, M. S. Fernandes, A. R. Gaspar, Álvaro Gomes, and J. J. Costa, “An integrated energy performance-driven generative design methodology to foster modular lightweight steel framed dwellings in hot climates,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 44, pp. 21–36, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.02.006>
- [13] E. de Angelis and E. Serra, “Light steel-frame walls: Thermal insulation performances and thermal bridges,” *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 362–371, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.039>

- [14] B. Schafer, D. Ayhan, J. Leng, P. Liu, D. Padilla-Llano, K. Peterman, M. Stehman, S. Buonopane, M. Eatherton, R. Madsen, B. Manley, C. Moen, N. Nakata, C. Rogers, and C. Yu, "Seismic response and engineering of cold-formed steel framed buildings," *Structures*, vol. 8, pp. 197–212, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.009>
- [15] T. Tafsirojjaman, S. Fawzia, D. Thambiratnam, and X. Zhao, "Seismic strengthening of rigid steel frame with cfrp," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 334–347, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.08.007>
- [16] J. R. da Silva Nogueira, I. J. Apolônio Callejas, and L. Cleonice Durante, "Desempenho de painel de vedação vertical externa em light steel framing composto por placas de madeira mineralizada," *Ambiente Construido*, vol. 18, no. 3, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300282>
- [17] F. Bolina, R. Christ, A. Metzler, U. Quinino, and B. Tutikian, "Comparison of the fire resistance of two structural wall systems in light steel framing," *DYNA*, vol. 84, no. 201, pp. 123–128, abr. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.57487>
- [18] E. Yandzio, R. M. Lawson, and A. G. J. Way, *Light steel framing in residential construction*. SCI. Silwood Par, Ascot, Berkshire, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xXZhoV>
- [19] P. E. Amador Salomão, A. D. Alves Soares, A. L. P. Lorentz, and L. T. Gonçalves de Paula, "Conventional masonry and light steel framing comparative analysis: a case study in unifammary residence in Teófilo Otoni, MG," *Research, Society and Development*, vol. 8, no. 9, p. e14891268, Jun. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i9.1268>
- [20] H. OlivieriIvan, I. C. Alves Barbosa, A. C. Da Rocha, A. Denis Granja, and P. S. Pucharelli Fontanini, "A utilização de novos sistemas construtivos para a redução no uso de insumos nos canteiros de obras: Light steel framing," *Ambiente Construido*, vol. 17, no. 4, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400184>
- [21] MIDUVI, *Acuerdo Ministerial: Reglamento para validación de tipologías y planes masa para proyectos de vivienda de interés social*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. República del Ecuador, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3HSg3ul>
- [22] —, *Eficiencia energética en edificaciones residenciales NEC-HS-EE*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. República del Ecuador, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/39U5CtD>
- [23] —, *Eficiencia energética en la construcción en Ecuador*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. República del Ecuador, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/39QqLoM>
- [24] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Summary for Policymakers*. Cambridge University Press, 2014, ch. Climate Change 2013 – The Physical Science Basis, pp. 1–30. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [25] S. A. Navarrete Boutaud, *Impacto de las infiltraciones de aire en el desempeño energético y térmico de las viviendas*. Universidad de Concepción. Chile, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3QSwxqg>
- [26] Design Builder. (2022) Design builder software. [Online]. Available: <https://bit.ly/3OnQ8gp>
- [27] Berkeley Lab. (2022) THERM. Windows and Daylighting. [Online]. Available: <https://bit.ly/3HU2iv6>
- [28] J. Roset Calzada, R. A. Vásquez Paredes, and L. M. Barajas Saldaña, "Ús efficient de programes informatics en arquitectura: Designbuilder i Dialux," *JIDA '14. II Jornadas sobre Innovación Docente en Arquitectura*, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5821/jida.2014.5027>
- [29] INEC. (2011) VII Censo de Población y VI de Vivienda. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. [Online]. Available: <https://bit.ly/3br35Ym>
- [30] H. Madrid, F. Opazo, and O. Parada, "Impacto de las infiltraciones de aire en el desempeño energético y térmico de las viviendas," *Construcción*, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3yn1Gev>
- [31] The U.S. Department of Housing and Urban Development Office of Policy Development and Research, *Steel vs. Wood. Cost Comparison. Beaufort Demonstration Homes*. Partnership for Advancing Technology in Housing, 2002. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ngPhCz>

NORMAS PARA PUBLICAR EN LA REVISTA INGENIUS

1. Información General

INGENIUS es una publicación científica de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, editada desde enero de 2007, con periodicidad fija semestral, especializada en Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Ciencias de la Computación y su integración en lo que actualmente se conoce como Mecatrónica; estas líneas de acción fortalecen áreas como automatización, control, robótica entre otras.

Es una revista científica arbitrada, que utiliza el sistema de evaluación externa por expertos (*peer-review*), bajo metodología de pares ciegos (*double-blind review*), conforme a las normas de publicación del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). El cumplimiento de este sistema permite garantizar a los autores un proceso de revisión objetivo, imparcial y transparente, lo que facilita a la publicación su inclusión en bases de datos, repositorios e indexaciones internacionales de referencia.

INGENIUS se encuentra indexada en la Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal – REDALYC, en Emerging Sources Citation Index, ESCI de Clarivate Analytics, en SciELO Ecuador, en el directorio y catálogo selectivo del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal – Latindex, en el Directorio de Revistas de Acceso Abierto – DOAJ, en la Matriz de Información para el Análisis de Revistas – MIAR, en la Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico – REDIB y en repositorios, bibliotecas y catálogos especializados de Iberoamérica.

La revista se edita en doble versión: impresa (ISSN: 1390-650X) y electrónica (e-ISSN: 1390-860X), en idioma español, siendo identificado además cada trabajo con un DOI (Digital Object Identifier System).

2. Alcance y Política

2.1. Temática

Contribuciones originales en materia de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Ciencias de la computación y su integración en lo que actualmente se conoce como Mecatrónica, así como áreas afines: Automatización, Control, Domótica, Robótica en sus diferentes ámbitos de acción y todas aquellas disciplinas conexas interdisciplinariamente con la línea temática central.

Podrán ser publicados todos los trabajos realizados por investigadores nacionales o extranjeros, una vez que cumplan los criterios de calidad científica requeridos.

2.2. Aportaciones

La revista INGENIUS publica preferentemente artículos relacionados con investigaciones empíricas, siendo también admisibles informes de desarrollo tecnológico, propuestas de modelos e innovaciones, productos de la elaboración de tesis de grado y posgrado siempre que sean un aporte para el campo de la ciencia y tecnología, así como selectas revisiones del estado del arte (*state-of-the-art*).

- **Investigaciones:** 4.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, palabras clave, tablas y referencias.
- **Informes, propuestas y productos:** 5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, tablas y referencias.

- **Revisiones:** 6.000 a 7.000 palabras de texto, incluidas tablas y referencias. Se valora especialmente las referencias justificadas, actuales y selectivas de alrededor de unas 40 obras.

La revista INGENIUS publica trabajos originales e inéditos redactados en español e inglés, no pueden haber sido publicados a través de ningún medio impreso ni electrónico, ni estar en proceso de arbitraje o publicación.

Todo artículo será sometido a un riguroso proceso de arbitraje; la evaluación del artículo se hará conforme a criterios de originalidad, pertinencia, actualidad, aportes, rigurosidad científica y cumplimiento de las normas editoriales establecidas.

Por tratarse de una publicación arbitrada, el Consejo Editorial aprueba su publicación en base al concepto de pares especializados. La recepción de un documento no implica compromiso de publicación.

Es indispensable presentar una carta de presentación y cover letter que se puede descargar de: <<https://goo.gl/xB0wE1>>.

Las contribuciones deben ser enviadas única y exclusivamente a través del OJS (Open Journal System) <<https://goo.gl/4xxjuo>>, en el cual todos los autores deben registrarse como usuario previamente. Para cualquier consulta del procedimiento se debe contactar a:

<revistaingenius@ups.edu.ec>,
<jcalles@ups.edu.ec> ó
<mquinde@ups.edu.ec>.

3. Presentación y estructura de los manuscritos

Para aquellos trabajos que se traten de investigaciones de carácter empírico, los manuscritos seguirán la estructura IMRDC (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones), siendo opcionales los epígrafes de Notas y Apoyos. Aquellos trabajos que por el contrario se traten de informes,

estudios, propuestas y revisiones podrán ser más flexibles en sus epígrafes, especialmente en Materiales y métodos, Resultados, y Discusión y Conclusiones. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias.

Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word (.doc o .docx) o L^AT_EX(.tex). La plantilla a ser utilizada puede ser descargada del sitio web de la revista, en formato de Microsoft Word en: <<https://goo.gl/ZA2XAk>>, mientras que para L^AT_EX en: <<https://goo.gl/Mwv8IC>>, es necesario que el archivo esté anonimizado en Propiedades de Archivo, de forma que no aparezca la identificación de autor/es.

Las Figuras, Gráficos y/o Ilustraciones, así como las Tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas; tanto las figuras, tablas y ecuaciones deben estar citadas en el texto.

Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.

Use “enter” al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use “enter” en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.

No centre encabezamientos o subencabezamientos ya que deben estar alineados a la izquierda.

Las Tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documento. Use tabuladores, no espacios, para crear columnas. Recuerde que el tamaño final de las páginas impresas será de 21 x 28 cm, por lo tanto las tablas deben estar diseñadas para ajustarse al espacio de la impresión final.

3.1. Estructura de los manuscritos

3.1.1. Presentación y Cover Letter

1. **Título (español) / Title (inglés):** Conciso pero informativo, en castellano en pri-

mera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español y viceversa si está escrito en inglés.

2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia e Institución a la que pertenece, país, ORCID. Se aceptarán como máximo 5 autores, aunque pudieran existir excepciones justificadas por la complejidad y extensión del tema.
 3. **Resumen (español) / Abstract (inglés):** Tendrá como extensión máxima 230 palabras, en español y en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa y en este orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología y muestra; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.
 4. **Palabras clave (español) / Keywords (inglés):** Se deben exponer 6 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.
 5. **Presentación (Cover Letter):** Una declaración de que el manuscrito se trata de una aportación original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista, con la confirmación de las autorías firmantes, aceptación (si procede) de cambios formales en el manuscrito conforme a las normas y cesión parcial de derechos a la editorial, según el formato establecido en: <<https://goo.gl/XAc9a3>>.
- ### 3.1.2. Manuscrito
1. **Título (español) / Title (inglés):** Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español y viceversa si está escrito en inglés.
 2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia a la que pertenece, Institución a la que pertenece, país, ORCID. Se aceptarán como máximo 5 autores, aunque pudieran existir excepciones justificadas por la complejidad y extensión del tema.
 3. **Resumen (español) / Abstract (inglés):** Tendrá como extensión máxima 230 palabras, en español y en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa y en este orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología y muestra; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.
 4. **Palabras clave (español) / Keywords (inglés):** Se deben exponer 6 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.
 5. **Introducción:** Debe incluir el planteamiento del problema, el contexto de la problemática, la justificación, fundamentos y propósito del estudio, utilizando citas bibliográficas, así como la literatura más significativa y actual del tema a escala nacional e internacional.
 6. **Materiales y métodos:** Debe ser redactado de forma que el lector pueda comprender con facilidad el desarrollo de la investigación. En su caso, describirá la metodología, la muestra y la forma de muestreo, así como se hará referencia al tipo de análisis estadístico empleado. Si

se trata de una metodología original, es necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y describir sus posibles limitaciones.

7. **Análisis y resultados:** Se procurará resaltar las observaciones más importantes, describiéndose, sin hacer juicios de valor, el material y métodos empleados. Deberán aparecer en una secuencia lógica en el texto y las tablas y figuras imprescindibles evitando la duplicidad de datos.
8. **Discusión y Conclusiones:** Resumirá los hallazgos más importantes, relacionando las propias observaciones con estudios de interés, señalando aportaciones y limitaciones, sin redundar datos ya comentados en otros apartados. Asimismo, debe incluir las deducciones y líneas para futuras investigaciones.
9. **Apoyos y agradecimientos (opcionales):** El Council Science Editors recomienda al autor/es especificar la fuente de financiación de la investigación. Se considerarán prioritarios los trabajos con aval de proyectos competitivos nacionales e internacionales.
10. **Las notas (opcionales):** Se deberán incluir solo en caso necesario, al final del artículo (antes de las referencias). Deben anotarse manualmente, ya que el sistema de notas al pie o al final de Word no es reconocido por los sistemas de maquetación. Los números de notas se colocan en superíndice, tanto en el texto como en la nota final. No se permiten notas que recojan citas bibliográficas simples (sin comentarios), pues éstas deben ir en las referencias.
11. **Referencias Bibliográficas:** Las citas bibliográficas deben reseñarse en forma de referencias al texto. Bajo ningún caso deben incluirse referencias no citadas en

el texto. Su número debe ser suficiente para contextualizar el marco teórico con criterios de actualidad e importancia. Se presentarán secuencialmente en orden de aparición, según corresponda siguiendo el formato de la IEEE.

3.2. Normas para las referencias Bibliográficas

Artículos de revistas:

- [1] J. Riess, J. J. Abbas, “Adaptive control of cyclic movements as muscles fatigue using functional neuromuscular stimulation”. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng vol. 9, pp.326–330, 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/7333.948462>

Libros:

- [1] G. O. Young, “Synthetic structure of industrial plastics” in *Plastics*, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw–Hill, 1964, pp. 15–64.

Reportes Técnicos:

- [1] M. A. Brusberg and E. N. Clark, “Installation, operation, and data evaluation of an oblique–incidence ionosphere sounder system,” in “Radio Propagation Characteristics of the Washington–Honolulu Path,” Stanford Res. Inst., Stanford, CA, Contract NOBSR–87615, Final Rep., Feb. 1995, vol. 1

Artículos presentados en conferencias (No publicados):

- [1] Vázquez, Rolando, Presentación curso “Realidad Virtual”. National Instruments. Colombia, 2009.

Artículos de Memorias de Conferencias (Publicados):

- [1] L. I. Ruiz, A. García, J. García, G. Taobada. “Criterios para la optimización de sistemas eléctricos en refinerías de la industria petrolera: influencia y análisis en el equipo eléctrico,” IEEE CONCAPAN

XXVIII, Guatemala 2008.

Tesis:

- [1] L.M. Moreno, “Computación paralela y entornos heterogéneos,” Tesis doctoral, Dep. Estadística, Investigación Operativa y Computación, Universidad de La Laguna, La Laguna, 2005.

Estándares:

- [1] IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings, IEEE Standard C57.19.100–1995, Aug. 1995.

Patentes:

- [1] J. P. Wilkinson, “Nonlinear resonant circuit devices,” U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

Manuales:

- [1] Motorola Semiconductor Data Manual, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Recursos de internet:

- [1] E. H. Miller, “A note on reflector arrays” [Online]. Available: <https://goo.gl/4cJkCF>

3.3. Epígrafes, tablas y figuras

Los epígrafes del cuerpo del artículo se deben numerar en arábigo. Irán sin caja completa de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La numeración ha de ser como máximo de tres niveles: 1. / 1.1. / 1.1.1. Al final de cada epígrafe numerado se dará un enter para continuar con el párrafo correspondiente.

Las tablas deben presentarse incluidas en el texto según orden de aparición, numeradas en arábigo y subtituladas con la descripción del contenido, el subtítulo debe ir en la parte superior de la tabla justificado a la izquierda.

Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi. No combine fotografías y dibujos lineales en la misma figura.

Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 21 x 28 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente un cuarto de su tamaño final de publicación. Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.

Las fotografías deben grabarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.

Dibujos lineales y mapas deben ser preparados en color negro.

El texto de las figuras y mapas debe escribirse con letras fácilmente legibles.

Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad del autor obtener el permiso correspondiente para evitar problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.

Cada figura debe ser entregada en un archivo aparte, ya sea como mapa de bits (.jpg, .bmp, .gif, o .png) o como gráfico vectorial (.ps, .eps, .pdf).

4. Proceso de envío

El envío será a través de la plataforma OJS de la revista, <<https://goo.gl/4xxjuo>>, si el envío se lo realiza en formato Word, se deberá cargar, como archivo original el manuscrito en .doc o .docx, con los datos del autor/es y su adscripción institucional; si el envío se lo realiza en formato latex deberá cargar como archivo original el pdf; además de la presentación y cover letter de acuerdo a lo antes descrito; también se deben cargar las figuras numeradas

de acuerdo a lo correspondiente en el manuscrito (como mapa de bits .jpg, .bmp, .gif, o .png o como gráfico vectorial .ps, .eps, .pdf), en calidad como mínima de 300 dpi y para el caso del formato latex un archivo comprimido con el código fuente del mismo.

Es obligatorio que todos los autores ingresen la información requerida en la plataforma OJS al momento de enviar un manuscrito y uno solo de los autores será el responsable de correspondencia.

Una vez enviada la contribución el sistema automáticamente enviará al autor para correspondencia un mail de confirmación de recepción de la contribución.

5. Proceso Editorial

Una vez que el manuscrito ha sido receptado en OJS se realiza una primera comprobación de los siguientes puntos:

- La temática se encuentre en concordancia con los criterios de la revista.
- Debe tener la estructura IMRDC, y seguir el formato de INGENIUS.
- Debe utilizar la forma de citación de la IEEE.
- Todas las referencias bibliográficas deben estar citadas en el texto del manuscrito al igual que las tablas, figuras y ecuaciones.
- El manuscrito es original, para esto se utiliza un software para determinar plagio.

Si alguno de los puntos anteriores no está completo o existe inconsistencia, se solicitará al autor las correcciones correspondientes, una vez que el autor modifique el artículo deberá remitir a través de la plataforma OJS. El equipo editorial verificará que las correcciones solicitadas han sido incorporadas, si cumple, el manuscrito iniciará la segunda parte del proceso y podrá ser seguido por el autor a través de OJS, caso contrario se notificará al autor y se archivará el manuscrito.

La segunda fase del proceso consiste en la

evaluación bajo la metodología de pares ciegos (doble-blind review), en los que se incluyen expertos nacionales y extranjeros considerando los siguientes pasos:

- El editor asigna dos o más revisores para el artículo.
- Una vez revisado el artículo, los revisores remitirán el informe de la evaluación, con uno de los siguientes resultados.
 - Publicable
 - Publicable con cambios sugeridos
 - Publicable con cambios obligatorios
 - No Publicable

■ El editor una vez recibida la evaluación por parte de los revisores analizará los resultados y determinará si el artículo es aceptado o negado.

■ Si el artículo es aceptado se notificará al autor para que realice las correcciones en caso de ser requeridas.

■ Si el artículo es negado se notificará al autor y se archivará el manuscrito.

■ En los dos casos anteriores se enviará el resultado de la evaluación de los revisores y sus respectivas recomendaciones.

La segunda fase del proceso dura 4 semanas como mínimo, luego de transcurridas las mismas se notificará al autor dando instrucciones para continuar con el proceso.

6. Publicación

La revista INGENIUS publica dos números por año, el 1º de enero y el 1º de julio por lo tanto es importante considerar las fechas para el envío de los artículos y su correspondiente publicación. Los artículos recibidos hasta el mes de octubre serán considerados para la publicación de enero y aquellos que se reciban hasta abril para la publicación de julio.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

Juan Cárdenas Tapia, sdb

Rector

©Universidad Politécnica Salesiana

Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja

Casilla postal 2074

Cuenca, Ecuador

Teléfono: (+593 7) 205 00 00

Fax: (+593 7) 408 89 58

Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

CANJE

Se acepta canje con otras publicaciones periódicas.

Dirigirse a:

Secretaría Técnica de Comunicación

Universidad Politécnica Salesiana

Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja

Casilla postal 2074

Cuenca, Ecuador

Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Ext. 1182

Fax: (+593 7) 408 89 58

Correo electrónico: rpublicas@ups.edu.ec

www.ups.edu.ec

Cuenca – Ecuador

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología,
Número Especial: Redes Eléctricas y Ciudades Inteligentes

N.º 28, julio/diciembre 2022

John Calle Sigüencia, PhD, Editor Jefe

revistaingenius@ups.edu.ec

Editores Temáticos

Sandro César Silveira Jucá, PhD

Sandra Céspedes, PhD

Esteban Inga Ortega, PhD

Impresión

Centro Gráfico Salesiano: Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres.

Teléfono: (+593 7) 283 17 45

Cuenca – Ecuador

Correo electrónico: centrograficosalesiano@lms.com.ec

OTRAS PUBLICACIONES PERIÓDICAS DE LA UNIVERSIDAD
UNIVERSITAS, Revista de Ciencias Sociales y Humanas.

LA GRANJA, Revista de Ciencias de la Vida.

ALTERIDAD, Revista de Educación.

RETOS Revista de Ciencias de la Administración y Economía.

UTOPIÍA, Revista de Pastoral Juvenil Universitaria.

SOPHIA, Colección de Filosofía de la Educación.



ABYA
YALA | UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
SALESIANA

