



REVISTA POLITÉCNICA



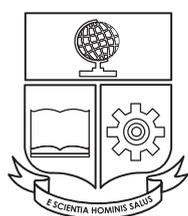
ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990

Volumen 48, Nro. 1, Agosto · Octubre 2021



REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990

Volumen 48, Nro. 1, Agosto - Octubre 2021

TEMÁTICA Y ALCANCE

La Revista Politécnica es una publicación periódica trimestral, editada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, cuyo objetivo es contribuir al conocimiento científico y tecnológico, mediante la publicación de estudios científicos relacionados a las áreas de ciencias básicas (Física, Química, Biología y Matemática) e ingenierías (Química y Agroindustria, Civil y Ambiental, Eléctrica y Electrónica, Geología y Petróleos, Mecánica, y Sistemas). La Revista Politécnica está dirigida a profesionales e investigadores que trabajan en estos campos del conocimiento.

EDITOR

Oscar Eduardo Camacho, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
editor.rp@epn.edu.ec

CO-EDITORA

Jenny Gabriela Torres, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
coeditor.rp@epn.edu.ec

CONSEJO EDITORIAL

Ph.D. José Aguilar
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Víctor Hugo Hidalgo
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. José Luis Paz
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Ph.D. Hernán Alvarez
Universidad Nacional Colombia, Colombia

Ph.D. Majid Khorami (C)
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Nelson Pérez
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Santiago Arellano Chalmers
University of Technology, Suecia

Ph.D. Hugo Leiva
Yachay Tech University, Ecuador

Ph.D. Franklin Rivas
Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile

Ph.D. Carlos Ávila
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Francisco León
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Andrés Rosales
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Leonardo Basile
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Orestes Llanes
Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba

Ph.D. Gabriel Salazar

Organización Latinoamericana de Energía, Ecuador

Ph.D. Silvia Calderón
Finnish Meteorological Institute, Finlandia

Ph.D. Wilfrido A. Moreno
University of South Florida, Estados Unidos

Ph.D. Gustavo Scaglia
Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Ph.D. Eduardo F. Camacho
Universidad de Sevilla, España

Ph.D. Diego Ordóñez
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Hebertt Sira-Ramirez
Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute, México

Ph.D. Juan Carlos De los Reyes
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Rui Pedro Paiva
University of Coimbra, Portugal

Ph.D. Sebastián Taco
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Pamela Flores
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

La Revista Politécnica está incluida en Scientific Electronic Library Online (SciELO), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (REDIB), Matriz de Información para el Análisis de Revistas (MIAR), Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CiteFactor, PKP Index, Google Scholar, ResearchBib, International Institute of Organized Research (I2OR), ICI World of Journals.

Se autoriza la reproducción total o parcial de su contenido siempre y cuando se cite la fuente. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores.

Coordinador Técnico Operativo

Ing. Ricardo Villarroel
ricardo.villarroel@epn.edu.ec

Ing. Katherine Aro
katherine.aro@epn.edu.ec

Proofreader

MSc. María Eufemia Torres

Diseño de Portada

Cristian Basurto
Diseñador Gráfico

AUTORIDADES

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**Vicerrectora de Investigación,
Innovación y Vinculación**
Alexandra Alvarado, Ph.D.

Rectora
Florinella Muñoz, Ph.D.

Vicerrector de Docencia
Iván Bernal, Ph.D.

Palabras del Editor

La Revista Politécnica se complace en compartir el tercer volumen del año 2021, el cual muestra seis artículos con temas de actualidad y de importancia para el país, asociados a distintas áreas del conocimiento. Estamos seguros que el contenido de estos manuscritos logrará cautivar el interés de investigadores, docentes y estudiantes en sus actividades propias. A continuación, se presenta un resumen de cada uno de estos trabajos:

En el primer trabajo, Ortiz-Ortiz y Llanes-Santiago presentan el artículo titulado: “Una Propuesta de Sistema de Diagnóstico de Fallos Robusto Ante la Presencia de Pérdida de Información y Ruido en Sistemas Mecánicos”. Los autores proponen una metodología para el diagnóstico de fallos en sistemas industriales mecánicos utilizando herramientas de inteligencia computacional que logra un comportamiento robusto ante la presencia de pérdida de información y el ruido logrando altos niveles de desempeño. La metodología propuesta se aplica al problema de prueba DAMADICS que representa a una válvula electro-neumática que es un tipo de actuador muy utilizado en los sistemas industriales modernos. Los resultados satisfactorios que se obtienen demuestran la efectividad y validez de la propuesta.

En el segundo artículo, Vasconez y colaboradores desarrollan el manuscrito: “Lahares Secundarios Desencadenados por Fusión Periglacial en el Volcán Chimborazo, Ecuador” Se inicia describiendo los procesos de fusión periglacial como una fuente de agua necesaria para desencadenar lahares secundarios en volcanes ya sea por fenómenos meteorológicos y/o erupciones volcánicas. Entre diciembre 2015 y abril 2016, cuatro lahares ocurrieron al sureste del volcán Chimborazo (Ecuador). El trabajo de campo permitió determinar el área ($1,67 \pm 0.37$ km²), volumen ($3E+05$ to $7E+05$ m³), caudal máximo (100 - 150 m³/s) y velocidad media (2 - 4 m/s) de estos flujos, que afectaron la infraestructura local y amenazaron a varias comunidades aguas abajo (>1000 personas). Este caso de estudio sugiere que el derretimiento anómalo de los periglaciares del Chimborazo pudo haber sido inducido por: i) un incremento en la temperatura superficial a alturas glaciares que fue parcialmente vinculado al fenómeno de El Niño, ii) una reducción del albedo del glaciar debido a la caída de ceniza del volcán Tungurahua (40 km al Este del Chimborazo) que estuvo en erupción desde 1999 hasta 2016 y, iii) un ligero incremento en la actividad interna del Chimborazo antes y durante la ocurrencia de los lahares, evidenciado por un aumento en el número de eventos sísmicos y la aparición de anomalías termales. Estos factores de forma simultánea pudieron facilitar la formación, estallido y/o derrame de lagunas superficiales e intra-glaciales proveyendo la fuente de agua necesaria para generar lahares secundarios en un volcán sin procesos eruptivos en curso.

En el tercer documento, Barahona y colaboradores presentan el artículo titulado: “Diseño e Implementación de Sensores Autónomos Inalámbricos para Sistemas Eléctricos de Protección Utilizando Microprocesadores de Bajo Consumo de Potencia”. El artículo presenta el diseño de un sensor autónomo para sistemas de protección eléctrica empleando tecnologías innovadoras que, para su operación, se abastecen de recursos energéticos del medio ambiente y además requieren de un bajo consumo de potencia. El prototipo posee tarjetas electrónicas que operan en cuatro etapas. La primera etapa se encarga de adquirir datos reales de corriente de un sistema eléctrico de prueba. En la segunda etapa, mediante el preprocesamiento y análisis de datos, se detectan perturbaciones en la señal de corriente del sistema eléctrico de prueba. La tercera etapa comprende la comunicación de datos por radiofrecuencia, la cual se ejecuta solo cuando su algoritmo de procesamiento ha detectado valores de corriente anormales, caso contrario, la transmisión de información se mantiene deshabilitada y con el dispositivo operando en modo de ultra bajo consumo de energía. La última etapa del sensor autónomo se encarga de proveerlo de energía mediante baterías de litio-polímero y paneles fotovoltaicos que aprovechan el uso y almacenamiento de la energía solar. Finalmente, para probar el sensor diseñado, se realizan varias pruebas de funcionamiento y se analizan los resultados obtenidos.

Cabrera, Montenegro y Guanulema presentan: “Análisis de la Correlación entre las Emisiones Gaseosas y el Desempeño Energético de Fuentes Fijas de Combustión en Ecuador. En esta investigación, se analizó la eficiencia de combustión de veinte hornos a gas y fuel oil de refinéras alrededor del Ecuador, y treinta calderos de diferentes industrias en la ciudad de Quito, así como las emisiones de gases generadas y la rentabilidad de la inserción de precalentadores de aire para mejorar los procesos de combustión. El estudio se realizó en un período de 6 meses, obteniéndose los factores de emisión en los hornos a gas de 4,5 kg de SO₂/kg de gas quemado; 22,4 de NO_X/kg de gas quemado y 44,5 kg de CO/ kg de gas quemado; mientras que los factores de emisión hallados para los hornos a fuel oil fueron de 93,9 kg de SO₂/kg de fuel oil; 24,9 kg de NO_X/kg de fuel oil y 2,5 kg de CO/kg de fuel oil. Por otra parte, los factores típicos de emisión de los calderos fueron de 1,7 kg de SO₂ /kg de diésel quemado; 1,5 kg de NO_X/kg de diésel quemado y 1,0 kg de CO/kg de diésel quemado. Finalmente, la implementación de un precalentador de aire aumenta la eficiencia del caldero analizado (CD20) en un 4,1%, lo cual implicó un valor actual neto (VAN) de USD 8 325,77 y un TIR del 31 %, con lo cual se determinó la factibilidad y rentabilidad del proyecto.

Toapaxi-Alvarez y Acero-Quilumbaquin realizan el trabajo: “Análisis de Inundación por Rotura de Presa Utilizando el Modelo HEC-RAS 2D: Caso de Estudio de la Presa Mulacorrall, Provincia de Tungurahua, Ecuador”. Este estudio tiene como objetivo analizar la inundación causada por la falla hipotética de la Presa Mulacorrall, cuyo embalse está localizado en la cuenca alta del río Ambato en la cota 3831 msnm. La presa está ubicada a 42 kilómetros en dirección noroeste de la ciudad de Ambato, capital de la Provincia de Tungurahua, Ecuador. Para el análisis, se consideró una longitud de cauce de 50 kilómetros aproximadamente, desde el pie de la presa hasta los límites de la ciudad de Ambato, en el sector de la planta de tratamiento de aguas residuales. Se ejecutó 10 planes de simulación considerando: el modo de la falla de la presa (tubificación y desborde), opciones de cómputo y tolerancias del programa. Los resultados fueron verificados con ecuaciones de regresión, desarrolladas con base en antecedentes históricos. Los escenarios de rotura presentan en todos los casos niveles de agua que alcanzan la estructura de la vía Flores e infraestructura que se encuentra en las riberas del río Ambato, en un margen promedio de 100 metros. De los escenarios de rotura planteados, se destaca el modelo que utiliza la Ecuación de Froehlich (2008) para falla por desborde, ya que presenta resultados conservadores, un caudal pico máximo de 1271 m³/s y un tiempo de llegada de 2 horas con 20 minutos a la ciudad de Ambato.

Finalmente, García-Hidalgo, Pérez-Martínez, y Rodríguez-Domínguez desarrollan el trabajo que lleva por nombre: “Implementación del Modelo Pss2b en Simulink”. Este trabajo presenta un estudio de los diferentes tipos de estabilidad que están presentes en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) atendiendo su naturaleza física, tamaño de la perturbación y escala de tiempo, con énfasis en los fenómenos oscilatorios de pequeña señal. Con el fin de mejorar la estabilidad de pequeñas señales, se implementa el ajuste del estabilizador de potencia 2B propuesto por la IEEE, y que no está implementado en la herramienta, utilizando la herramienta Simulink de Matlab versión R2017a, se toman como esquema base el propuesto en Kundur (1993). El comportamiento que presenta el modelo mostrado ante una perturbación es comparado con modelos ya implementados en la herramienta, observándose un mejor comportamiento y confiabilidad.

Queremos agradecer a nuestros autores por la calidad de sus trabajos, a los revisores por su generoso apoyo e invaluable comentarios para mejorar los artículos, a nuestros lectores que cada día consideran a la Revista Politécnica como una referencia en sus investigaciones y a todo el equipo de la Revista Politécnica por su mística de trabajo y sentido de pertenencia.

Oscar Eduardo Camacho Quintero, Ph.D.

EDITOR

Contenido
Vol. 48, No. 1
Agosto – Octubre 2021

7

Ortiz Ortiz Francisco Javier; Llanes-Santiago Orestes

Una Propuesta de Sistema de Diagnóstico de Fallos Robusto Ante la Presencia de Pérdida de Información y Ruido en Sistemas Mecánicos

A Proposal of Robust Fault Diagnosis System in Presence of Missing Data and Noise in Mechanical Systems

19

Vasconez Francisco J.; Maisincho Luis; Andrade S. Daniel; Cáceres Bolívar;
Bernard Benjamin; Argoti Cristina; Telenchana Edwin; Almeida Marco; Almeida Stefanie;
Lema Verónica

Secondary Lahars Triggered by Periglacial Melting at Chimborazo Volcano, Ecuador

Lahares Secundarios Desencadenados por Fusión Periglacial en el Volcán Chimborazo, Ecuador

31

Barahona Andrés; Salazar Jaime; Soria Mauricio; Novoa Edison; Caina Darwin;
Pérez Fabián

Diseño e Implementación de Sensores Autónomos Inalámbricos para Sistemas Eléctricos de Protección Utilizando Microprocesadores de Bajo Consumo de Potencia

Design and Implementation of Autonomous Wireless Sensors for Electrical Protection Systems Using Ultra Low Power Consumption Microprocessors

43

Cabrera Marcelo; Montenegro Lucía; Guanulema Jorge

Análisis de la Correlación entre las Emisiones Gaseosas y el Desempeño Energético de Fuentes Fijas de Combustión en Ecuador

Analysis of the Correlation Between Gaseous Emissions and Energy Performance of Fixed Combustion Sources in Ecuador

51

Toapaxi-Alvarez Jorge; Acero-Quilumbaquin Andrés

Análisis de Inundación por Rotura de Presa Utilizando el Modelo HEC-RAS 2D: Caso de Estudio de la Presa Mulacorrall, Provincia de Tungurahua, Ecuador

Dam-Break Flooding Analysis Using HEC-RAS 2D Model: Case Study of the Mulacorrall Dam, Tungurahua Province, Ecuador

65

García Hidalgo Ernesto; Pérez Martínez Maykop; Rodríguez Domínguez Yandry

Implementación del Modelo Pss2b en Simulink

Implementation of the Model Pss2b in Simulink

Una Propuesta de Sistema de Diagnóstico de Fallos Robusto Ante la Presencia de Pérdida de Información y Ruido en Sistemas Mecánicos

Ortiz Ortiz, Francisco Javier ¹  ; Llanes-Santiago, Orestes ^{2,*} 

¹Universidad Politécnica Salesiana, Programa de Maestría en Electrónica y Automatización, Cuenca, Ecuador

²Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE, Dpto. de Automática y Computación, La Habana, Cuba

Resumen: Hoy en día, es un requisito de la industria moderna lograr elevados rendimientos económicos con un aumento continuo de la calidad de los productos finales, tener elevados niveles de seguridad industrial y reducir al mínimo las posibles afectaciones al medio ambiente; todo lo cual hace necesario la rápida detección e identificación de los fallos que se presenten en los sistemas industriales. La evolución de la Internet de las cosas y los avances tecnológicos en los medios técnicos de automatización, las redes industriales y las comunicaciones inalámbricas entre otros elementos, han permitido un crecimiento significativo del número de herramientas a usar para el tratamiento y gestión de la información obtenida por los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) de los procesos industriales. Sin embargo, el desempeño de estas herramientas y en especial de los sistemas de diagnóstico de fallos se ve afectado por dos problemas concretos: la presencia de ruido en las mediciones y la pérdida de información de variables medidas. En el presente trabajo se propone una metodología para el diagnóstico de fallos en sistemas industriales mecánicos utilizando herramientas de inteligencia computacional que logra un comportamiento robusto ante la presencia de pérdida de información y el ruido logrando altos niveles de desempeño. La metodología propuesta se aplica al problema de prueba DAMADICS que representa a una válvula electro-neumática que es un tipo de actuador muy utilizado en los sistemas industriales modernos. Los resultados satisfactorios que se obtienen demuestran la efectividad y validez de la propuesta.

Palabras claves: Diagnóstico de fallos, pérdida de datos, ruido, imputación de datos, procesos industriales, inteligencia computacional

A Proposal of Robust Fault Diagnosis System in Presence of Missing Data and Noise in Mechanical Systems

Abstract: Currently, the modern industry requires to achieve high economic returns with a continuous increase in the quality of the final products, to have high levels of industrial safety and to minimize possible effects on the environment. For accomplishing these requirements, it is necessary a fast detection and identification of faults that occur in the industrial systems. The evolution of the Internet of things and technological advances in automation devices, industrial networks and wireless communications, among other elements, have allowed a significant growth in the number of tools to be used for the treatment and management of the information obtained from the industrial processes by the supervision, control and data acquisition systems (SCADA). However, the performance of these tools, and especially of the fault diagnosis systems, are affected by two specific problems: the presence of noise and missing information on the measured variables. In this paper, a novel methodology for fault diagnosis in mechanical industrial systems is proposed by using computational intelligence tools. The proposal presents a robust behavior in presence of missing data and noise in the measurements by achieving high levels of performance. The proposed methodology is applied to the DAMADICS actuator FDI benchmark which is an electro-pneumatic valve widely used in modern industrial systems. The satisfactory results obtained demonstrate the effectiveness and validity of the proposal.

Keywords: Fault diagnosis, missing data, noise, data imputation, industrial processes, computational intelligence

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los sistemas industriales se encuentran en constante proceso evolutivo, y ya es cotidiano el uso de términos como

industria inteligente y cuarta revolución industrial o industria 4.0 (Ustundag & Cevikcan, 2017). Estos términos hacen referencia a la interconexión de todos los componentes de una industria para conseguir un funcionamiento automatizado efectivo que logre

*orestes@tesla.cujae.edu.cu

Recibido: 24/06/2021

Aceptado: 06/07/2021

Publicado: 31/08/2021

10.33333/tp.vol48n1.01

CC 4.0

elevados rendimientos económicos con un aumento continuo de la calidad de los productos finales, tener elevados niveles de seguridad industrial y reducir al mínimo las posibles afectaciones al medio ambiente (Zabiński et al., 2019). Para lograr la anterior se necesita la detección y localización temprana de los fallos que comúnmente aparecen en los sistemas industriales en sensores, actuadores y/o en los procesos ya que los mismos se traducen directamente en problemas de seguridad para los operadores, posibles afectaciones al medio ambiente y pérdidas económicas. Estas razones han motivado el desarrollo de un gran número de investigaciones en el campo del diagnóstico de fallos en procesos industriales en las últimas décadas. (Chen & Li, 2018; Rodríguez et. al., 2019; Ahmed et al., 2021).

Los sistemas mecánicos son parte fundamental de cualquier industria y sobre todo de la industria moderna de manufactura y es precisamente en estos sistemas mecánicos, donde se presenta una gran parte de los fallos que ocurren en los sistemas industriales (Rodríguez et. al., 2019; Aydin et al., 2014).

En general, las metodologías propuestas en la literatura científica para el diagnóstico de fallos pueden agruparse en dos grandes grupos: los métodos basados en modelos (Camps-Echevarría et al., 2010; Rivera et al., 2018) y los métodos basados en datos históricos (Rodríguez Ramos et. al., 2019; Llanes-Santiago et. al., 2018). En el primer grupo, es necesario el uso de modelos que representen los diferentes modos de operación de los procesos. Las herramientas establecidas en este enfoque se basan en la generación de residuos que se generan de la diferencia entre las mediciones que se obtienen directamente del proceso real y los valores obtenidos del modelo de dicho proceso. La gran dificultad en la aplicación de las metodologías basadas en modelos es que se necesita un elevado conocimiento de las características del proceso, sus parámetros y zonas de operación y en la actualidad eso es difícil lograrlo por la elevada complejidad de las plantas industriales modernas. Por otra parte, los métodos basados en datos no necesitan de un modelo matemático preciso y no requieren de un elevado conocimiento inicial de los parámetros del proceso (Prieto-Moreno et al., 2015; Cerrada et al., 2018). En ese sentido, existen múltiples propuestas que utilizan herramientas computacionales y matemáticas como: lógica difusa (Rodríguez Ramos et. al., 2019), agrupamiento (Cerrada et al., 2016; Rodríguez et. al., 2019), herramientas estadísticas (Rezamand et. al., 2020; Prieto-Moreno et al., 2015) y redes neuronales (Saufi et. al., 2020) por solo mencionar algunas.

Entre los principales factores que afectan seriamente a las metodologías de diagnóstico de fallos basados en datos históricos se encuentran los datos fuera de rango, los ruidos en las mediciones y la pérdida de información todo lo cual es muy común en los ambientes industriales. De lo anterior surge la necesidad de atender esta problemática para que el diagnóstico de fallos sea robusto, evitándose falsas alarmas y la pérdida de confiabilidad del sistema (Askarian et al., 2016).

Las observaciones con valores incompletos pueden deberse a diversas fuentes como fallos en los sensores, problemas de funcionamiento ocasionales de los sistemas de adquisición de datos, posi-

bles errores en las redes de transmisión de datos y en los protocolos de comunicación por solo mencionar los más comunes. Varios métodos para el tratamiento de los datos perdidos se han propuesto en la literatura científica (Askarian et al., 2016; Laencina et al., 2010; Sovilj et al., 2016). Los principales son (Laencina et al., 2010):

- Ignorar y eliminar los datos incompletos: se usan solo los datos que estén completos.
- Imputar o estimar los datos perdidos mediante herramientas estadísticas o de inteligencia computacional.
- Modelo basado en la distribución de los datos.
- Máquinas de Aprendizaje: procedimientos donde los valores perdidos se incorporan al clasificador.

Cuando se realiza una revisión de las técnicas más utilizadas para tratar los datos perdidos se llega a la conclusión que son los dos primeros métodos mencionados anteriormente los más usados. Sin embargo la información perdida puede ser importante para descubrir posibles relaciones entre las variables y condiciones anormales de operación (Askarian et al., 2016). Es por esta razón que lo más recomendado para el tratamiento de los datos perdidos en el caso del diagnóstico de fallos es el de imputar. Con este proceso se estiman los valores perdidos usando toda la información disponible y no se eliminan observaciones que pueden contener información importante para la labor de diagnóstico (Askarian et al., 2016; Llanes-Santiago et. al., 2018).

Son múltiples los trabajos encontrados que abordan las técnicas basadas en imputación o estimación de parámetros (Askarian et al., 2016; Laencina et al., 2010; Sovilj et al., 2016). Sin embargo, todos los métodos realizan la imputación utilizando el conjunto de datos completo o parte del mismo y no se establecen requerimientos estrictos de tiempo.

En el caso de los sistemas industriales, las exigencias son muy elevadas. La imputación de las variables perdidas de una observación obtenida hay que hacerla en línea y con requerimientos de tiempo estrictos determinados por el período de muestreo que se ha establecido en el sistema de adquisición de datos. Además, hay que tener en cuenta que todas estas mediciones están afectadas por el ruido que es característico en los procesos industriales.

En los últimos años las redes neuronales de aprendizaje profundo han ido incrementando su popularidad por su capacidad de aprender características no lineales complejas que permiten mejorar significativamente el poder discriminativo en los procesos de clasificación. En Eren & Kiranyaz (2019), y Lee et. al. (2019) se propone el uso de redes neuronales convolucionales (CNN) que aprenden características altamente discriminantes directamente de los datos del sensor de entrada sin procesar, logrando un rendimiento competitivo con una configuración CNN simple y compacta. En Medina et. al. (2019), Chen et al. (2021) y Xiao et. al. (2019) se propone el uso de redes neuronales de aprendizaje profundo por su facilidad para aprender características importantes de señales sin un procesamiento previo. En Rezamand et. al. (2020) se propone el uso de la transformada wavelet para la detección de fallos en señales de vibración con un sistema

híbrido de detección de fallos basado en una combinación de una red neuronal de regresión generalizada para imputación única (GRNN-ESI), análisis de componentes principales (PCA) y función de densidad de probabilidad basada en wavelets (PDF). Existen otras propuestas de combinación de diferentes herramientas para el análisis de señales para mejorar el rendimiento de los sistemas de detección de fallos, como el caso de Li et. al. (2021) donde se propone un método para crear modelos de detección de fallos solo a partir de datos normales para la detección de fallos en impresoras 3D.

El objetivo principal de este trabajo es proponer una metodología de diagnóstico de fallos para sistemas mecánicos presentes en la industria basada en un esquema híbrido que combina algoritmos de imputación de fácil implementación con herramientas de aprendizaje profundo. La metodología que se propone realiza la imputación en línea de los datos perdidos logrando elevados niveles de desempeño en la clasificación de los fallos a partir de utilizar una red neuronal de aprendizaje profundo de tipo *LSTM* (por sus siglas en inglés *Long Short Term Memory*). La propuesta presenta un comportamiento muy robusto ante la presencia de ruido y las posibles desviaciones que puede introducir el proceso de imputación de los datos perdidos. Lo anterior también constituye la principal contribución de este trabajo.

La organización del artículo es la siguiente: en la sección 2 se presentan: la metodología propuesta, las características generales de las herramientas utilizadas en la misma, el caso de estudio y el diseño de los experimentos. En la sección 3 se realiza el análisis y discusión de los resultados obtenidos. Además, se realiza una comparación de los resultados obtenidos por la propuesta con los obtenidos por otros esquemas de diagnósticos presentados recientemente en la literatura científica. Finalmente, se presentan las conclusiones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Mecanismos de pérdida de información

En Little & Rubin (2014) se exponen los tres tipos de mecanismos de pérdida de información que se pueden presentar. Los mismos son:

- **Pérdida de información completamente aleatoria (MCAR):** La probabilidad de que se pierda información de una variable X en una observación no está relacionada con las otras variables medidas ni con los valores de la propia variable X . Lo anterior indica que la pérdida de información no depende de los valores de entrada.
- **Pérdida de información aleatoria (MAR):** La pérdida de información es independiente de las variables perdidas pero el patrón de pérdida de datos se puede predecir a partir del conjunto de las variables.
- **Pérdida de información no aleatoria (NMAR):** El patrón de datos perdidos no es aleatorio y depende de las variables perdidas.

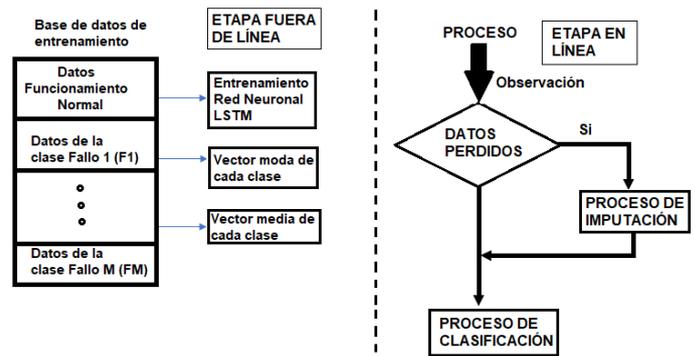


Figura 1. Metodología propuesta para el diagnóstico de fallos con mediciones ruidosas y datos perdidos

En los sistemas industriales el mecanismo de pérdida de información que mayoritariamente se presenta es el MCAR y es el que utilizaremos en este trabajo.

2.2 Metodología propuesta para el sistema de diagnóstico

Es conocido de la literatura científica que para la utilización de herramientas de diagnóstico de tipo supervisadas se requiere disponer de una base de datos que contenga la cantidad de observaciones necesarias del estado de funcionamiento normal y de cada uno de los estados de fallo de manera tal que se pueda realizar el entrenamiento de la herramienta a utilizar para lograr los mejores resultados en el proceso de clasificación (Watanabe et al., 1989). Por lo anterior se dispondrá de un matriz de entrenamiento $E \in \mathfrak{R}^{n \times p}$ compuesta de n observaciones de p variables cada una. A cada clase $C_l \in \mathfrak{R}^{k \times p}$ para $l = 1, 2, \dots, nc$ corresponden k observaciones por lo que $n = nc * k$ donde nc representa el número de clases del sistema.

En la Figura 1 se presenta la metodología propuesta para el diagnóstico de fallos en este trabajo. La misma está compuesta de dos etapas: fuera de línea y en línea.

En la etapa fuera de línea, se realiza el entrenamiento de la red neuronal *LSTM*. Además, se obtienen los vectores con las medias aritméticas (\bar{X}_{C_l}) y los vectores con los valores de la moda (X_{MC_l}) de las variables de cada clase presente en el sistema las cuales representan el modo de funcionamiento normal y los modos de operación característico de cada uno de los fallos.

En la etapa en línea, cada vez que se recibe una observación se analiza si tiene datos perdidos o no. En caso de no tener datos perdidos se realiza el proceso de clasificación de la observación. En caso de que se detecten variables perdidas se realizará la imputación.

2.2.1 Proceso de imputación

Al recibirse una nueva observación con variables perdidas se realiza el siguiente procedimiento para imputar en línea:

1. Se recibe una observación en línea $X \in \mathfrak{R}^{1 \times p}$ con r datos perdidos. Se eliminan las r variables perdidas en la nueva observación y en los vectores de valores medios obtenidos en la

etapa fuera de línea. Se calcula la distancia de la observación $X \in \mathfrak{R}^{1 \times p-r}$ a los vectores $\bar{X}_{C_l} \in \mathfrak{R}^{1 \times p-r}$ ($d_l = X - \bar{X}_{C_l}$) de las clases representadas en la matriz de datos histórica utilizada para el entrenamiento. Se determina la distancia mínima ($\min(d_l)$) y con esta, la clase a la que se asignará la nueva observación. La medida de distancia utilizada en este trabajo es la distancia euclidiana.

2. Se realiza el proceso de imputación con el método que se haya decidido utilizar.
3. Una vez estimados todos los valores perdidos se clasifica la observación usando la herramienta de clasificación del sistema de diagnóstico.

Observación: Es posible que la herramienta de diagnóstico clasifique a la observación con los datos estimados en una clase diferente a la que fue asignada para realizar el proceso de imputación. La razón de esto se explica en el grado de solapamiento que pueden tener algunas clases en el espacio de las observaciones.

2.3 Herramientas para la imputación de los datos perdidos

En este trabajo, se utilizarán dos métodos de imputación: la media aritmética y la moda. Estos métodos fueron escogidos por su demostrada efectividad y la sencillez de su implementación.

Para la imputación de datos perdidos usando la media aritmética se utilizan los valores medios de las variables en cada clase calculados en el proceso fuera de línea (\bar{X}_{C_l}). Es conocido que la media de un conjunto de datos se ve afectada por los datos conocidos como datos fuera de rango. Para evitar esa afectación la base con los datos de entrenamiento debe ser tratada previamente a su uso con alguno de los métodos muy conocidos en ramas matemáticas como la Estadística para la eliminación de este tipo de datos.

Una manera de evitar los efectos que producen los datos fuera de rango es usando el valor de la moda de un conjunto de datos la cual representa el valor de información que más se repite en el conjunto. Usar el valor de la moda permite no tener que hacer un tratamiento de los datos de entrenamiento para eliminar los datos fuera de rango.

Al determinarse en la observación las variables perdidas y una vez clasificada la observación en una clase, se accede al vector de valores medios (\bar{X}_{C_l}) o al vector de valores de la moda de esa clase (X_{MC_l}), según sea el método que se utilice, y se le agrega a la observación el valor correspondiente al valor medio o la moda de cada variable perdida en la posición que le corresponde en la observación.

2.4 Red Neuronal LSTM

La red neuronal LSTM pertenece a la familia de las redes neuronales recurrentes (RNN). Son ideales en el aprendizaje, procesamiento y clasificación de datos secuenciales. Ella fue propuesta por Hochreiter y Schmidhuber en Hochreiter & Schmidhuber (1997) y posteriormente Gers (Ger et. al., 2000)

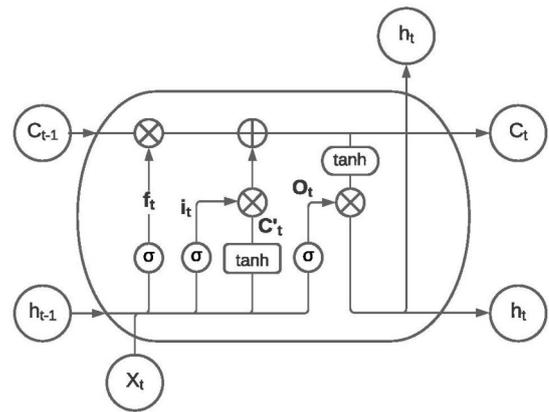


Figura 2. Celda de una red LSTM

propuso una variación que mejoró su funcionamiento. Las redes LSTM tienen como objetivo superar el tema de la desaparición exponencial de los gradientes de error presentes en el entrenamiento por backpropagation de las RNN, utilizando compuertas para retener selectivamente la información que es relevante y olvidando la información que no es relevante. La sensibilidad más baja a la brecha de tiempo hace que las redes LSTM sean mejores para el análisis de datos secuenciales que las RNN.

En las unidades LSTM, cuando los valores de error son propagados de nuevo desde la capa de salida, el error permanece en la celda de la unidad LSTM. Este retorno del error alimenta continuamente el error a cada una de las puertas de la unidad LSTM, hasta que aprenden a eliminar el valor que no es relevante.

Una de las características principales de este tipo de arquitectura de aprendizaje profundo es que puede recordar estados previos, por lo que es un tipo de red muy utilizada en datos de series cronológicas. Las redes LSTM son capaces de aprender dependencias a largo plazo. El modelo almacena la información de la serie de tiempo en la memoria, basada en la importancia expresada por pesos que son aprendidos por el algoritmo. Una diferencia con respecto a las redes neuronales recurrentes (RNN), es el estado de la celda donde se puede agregar o eliminar información a través de estructuras reguladas conocidas como puertas. La arquitectura de la celda LSTM básica se muestra en la Figura 2. Normalmente, un bloque de LSTM tiene una celda de memoria, puerta de entrada, puerta de salida y una puerta de olvido.

La primera etapa conocida como puerta de olvido, decide qué información se desechará. La función f_t viene dada por la Ecuación (1), donde σ denota la función sigmoidea. La puerta lee h_{t-1} y x_t y genera un valor de salida entre 0 y 1; donde 0 significa "completamente descartado", y 1 "completamente reservado".

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (1)$$

El siguiente paso consiste en decidir qué nueva información se almacenará en la celda de estado indicado como C_t . Esta tarea es realizada usando dos funciones. La puerta de entrada que es una función sigmoidea que decide qué valores se actualizarán y una función adicional \tanh que crea un nuevo vector de valores candi-

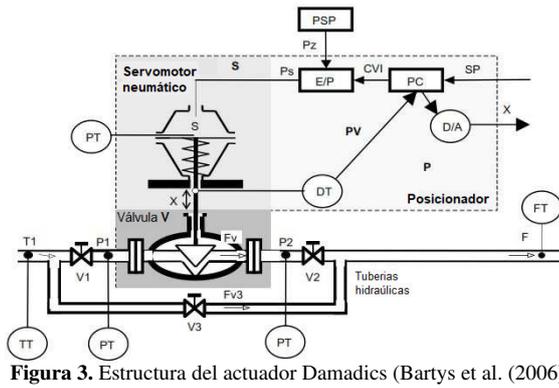


Figura 3. Estructura del actuador Damadics (Bartys et al. (2006))

a través de la instalación de la tubería. El servomotor realiza un cambio en la posición del obturador de la válvula de control, actuando sobre el caudal de fluido. El servomotor neumático de resorte y diafragma es un dispositivo accionado por fluido compresible en el que el fluido actúa sobre el diafragma flexible, para proporcionar movimiento lineal del vástago del servomotor. El posicionador ayuda a eliminar las posiciones incorrectas del vástago de la válvula de control producidas por las fuentes externas o internas tales como: fricción, holgura en montajes mecánicos, variaciones de presión de suministro, fuerzas hidrodinámicas, entre otros. En este actuador se diagnosticarán 5 fallos los cuales se muestran en la Tabla 1.

datos, de acuerdo con las Ecuaciones (2) y (3). En estas ecuaciones, W representa los pesos y b la desviación o *bias*:

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \tag{2}$$

$$C'_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \tag{3}$$

La combinación de ambas funciones permite actualizar el estado de la celda según lo propuesto por la Ecuación (4):

$$C_t = f_i \cdot C_{t-1} + i_t \cdot C'_t \tag{4}$$

Finalmente, la salida de la celda está definida por la puerta de salida de acuerdo con la Ecuación (5) y (6):

$$O_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \tag{5}$$

$$h_t = O_t \cdot \tanh(C_t) \tag{6}$$

La red *LSTM* propuesta utiliza el algoritmo de optimización *ADAM* (*Adaptive Moment Estimation*) (Kingma & Lei Ba, 2017), que es una extensión del algoritmo *SGD* (*Stochastic Gradient Descent*) y permite actualizar los pesos de la red de forma iterativa en función de los datos de entrenamiento.

2.5 Caso de estudio: DAMADICS

Para validar la propuesta de metodología que se presenta en este trabajo se va a utilizar el problema de prueba DAMADICS que representa un actuador electro-neumático inteligente de muy amplio uso en las industrias y representativo de un sistema mecánico (Bartys et al., 2006). Toda la información relacionada con este proceso de prueba y los datos utilizados puede ser encontrado en <http://diag.mchtr.pw.edu.pl/damadics/>. Este actuador consta de las siguientes partes:

- Válvula de control
- Servomotor neumático de resorte y diafragma
- Posicionador

La estructura general de este actuador se muestra en la Figura 3.

De manera general, el funcionamiento del actuador es el siguiente: la válvula de control actúa sobre el flujo del fluido que pasa

Tabla 1. Fallos simulados en DAMADICS

Fallo	Descripción
1	Obstrucción de la válvula
7	Flujo crítico
12	Fallo del transductor electroneumático
15	Fallo del resorte del posicionador
19	Fallo del sensor de caudal

Estos fallos fueron escogidos por ser representativos de diferentes partes del actuador y en el caso de los fallos F15 y F19 son fallos que sus patrones se superponen dificultando la clasificación correcta.

Las variables medidas se presentan en la Tabla 2

Tabla 2. Variables medidas en el proceso

Descripción	Variable
Señal externa del control de proceso	CV
Presión en el fluido de ingreso	P1
Presión en el fluido de salida	P2
Desplazamiento del vástago	X
Tasa de flujo de líquido	F
Valor del proceso	PV

2.6 Índices para medir el desempeño

En este trabajo la robustez de la metodología propuesta se considera a partir de lograr un desempeño elevado de clasificación correcta con un bajo porcentaje de falsas alarmas tal y como se define en Patan (2008). Por lo tanto, para medir el desempeño y la robustez del sistema propuesto a partir de los resultados de la matriz de confusión, se utilizarán los siguientes índices:

Exactitud (Acc): Este indicador evalúa el desempeño general del clasificador. Se define como:

$$Acc = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN} \tag{7}$$

donde **VP** (Verdaderos Positivos) representa la cantidad de observaciones pertenecientes a una clase clasificadas correctamente, **FP** (Falsos Positivos) representa la cantidad de observaciones clasificadas erróneamente como correctas, **VN** (Verdaderos Negativos) representa la cantidad de observaciones no pertenecientes a una clase clasificadas correctamente como negativas y **FN** (Falsos

Negativos) representa la cantidad de observaciones clasificadas como que no pertenecen a una clase y sin embargo si pertenecen a la misma.

Razón de Falsas Alarmas (FAR): Es un indicador importante porque indica la razón de observaciones correspondientes al funcionamiento normal que son clasificadas erróneamente como si fueran algún tipo de fallo y se define como:

$$FAR = \frac{FP}{VN + FP} 100\% \quad (8)$$

2.7 Diseño de los experimentos

2.7.1 Arquitectura de la red LSTM

Para la aplicación en la propuesta realizada en este trabajo, la red LSTM se forma mediante la conexión en cascada entre varias capas como se muestra en la Figura 4. Primeramente se encuentra una capa de entrada que recibe las 6 variables que se miden en el proceso; una capa LSTM con 500 unidades ocultas con el formato de salida configurado en modo secuencia completa; una capa de tipo dropout para reducir el sobre-entrenamiento y mejorar la capacidad de generalización de la red; una capa totalmente conectada de 6 clases (correspondientes a los 6 estados de funcionamiento del sistema); seguida de una capa con la función exponencial normalizada o función softmax (Bishop, 2006) y una capa de clasificación a la salida.

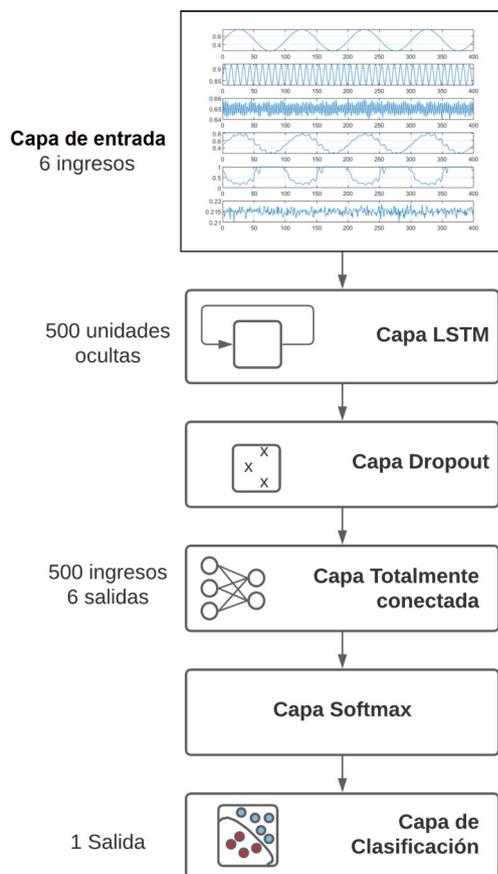


Figura 4. Arquitectura de la red neuronal LSTM empleada

2.7.2 Entrenamiento de la red

Una red LSTM se entrena de manera supervisada utilizando un conjunto de secuencias de entrenamiento. Para el entrenamiento se utilizó una combinación entre el algoritmo de optimización ADAM con parámetros $\beta_1 = 0.9$ y $\beta_2 = 0.999$ como fue propuesto en Kingma & Lei Ba (2017), combinado con el algoritmo BPTT (backpropagation through time) para calcular los gradientes necesarios durante el proceso de optimización, con el fin de cambiar cada peso de la red de LSTM en proporción a la derivada del error en la capa de salida, respecto al peso correspondiente. Como función de activación para actualizar la celda y el estado oculto se usó la función de activación tangente hiperbólica (*tanh*). El número máximo de épocas utilizadas para el entrenamiento fue de 500 y un umbral de gradiente igual a 2. Para prevenir un sobre entrenamiento de la red se incluyó la capa dropout con una probabilidad de descartar elementos de entrada, especificada como un escalar numérico igual a 0,1.

La tasa de aprendizaje (*LR*) es un parámetro importante que influye en el ajuste de pesos y la convergencia de errores. Al elegir una tasa de aprendizaje adecuada, podemos acelerar la convergencia de la red LSTM y mejorar su precisión. En este experimento, la tasa de aprendizaje empleada fue de $LR = 0,001$.

Para conformar la matriz de datos para el entrenamiento de la red neuronal LSTM en la etapa fuera de línea se utilizaron $k = 1000$ observaciones de cada una de las $nc = 6$ clases (FN: Funcionamiento Normal, F1: Fallo 1, F7: Fallo 7, F12: Fallo 12, F15: Fallo 15, F19: Fallo 19) almacenadas con un período de muestreo de 1 segundo. En cada observación se leen los valores de las $p = 6$ variables descritas anteriormente en la Tabla 2. Lo anterior indica que la base de datos de entrenamiento está conformada por $n = 6000$ observaciones las cuales no tienen ruido asociado ni variables perdidas.

Para el entrenamiento y validación de la red neuronal LSTM propuesta en la etapa fuera de línea se utilizó el proceso de K-validación cruzada (Devijver & Kittler, 1982). En este caso se seleccionó $K = 5$.

Los resultados obtenidos en el proceso de entrenamiento se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Matriz de confusión para la validación cruzada. Precisión: 97.583 %

	F1	F12	F15	F19	F7	Normal	Acc(%)	FAR(%)
F1	195	0	0	0	0	5		
F12	0	199	0	0	1	0		
F15	0	4	194	2	0	0		
F19	0	0	2	198	0	0		
F7	1	0	0	0	199	0		
Normal	11	0	0	3	0	186		
GEN							97,583	0

2.7.3 Experimentos a realizar

Para realizar los experimentos relacionados con la etapa en línea, se utilizó una base de datos con 400 observaciones distintas a las

usadas en el entrenamiento por cada estado de funcionamiento del sistema por lo que la base de datos para los experimentos estuvo formada por 2400 observaciones. Para garantizar la repetitividad de los resultados cada experimento fue repetido 100 veces y como resultado final se obtuvo el promedio de los resultados obtenidos en esas 100 repeticiones.

Se realizaron los siguientes experimentos para evaluar el desempeño del sistema de diagnóstico con las siguientes características en los datos:

1. Observaciones sin información perdida
 - a) Sin ruido
 - b) Con 2% de ruido
 - c) Con 5% de ruido
2. Observaciones con 1 variable perdida por observación de forma aleatoria
 - a) Sin ruido
 - b) Con 2% de ruido
 - c) Con 5% de ruido
3. Observaciones con una cantidad aleatoria de variables perdidas entre 0 y 2
 - a) Sin ruido
 - b) Con 2% de ruido
 - c) Con 5% de ruido

Para cada experimento, la base de datos con las 2400 observaciones se preparó adecuadamente de acuerdo al tipo de experimento. Para los experimentos con ruido se adicionó a las observaciones un ruido blanco de media cero y con valor del 2% y del 5% del valor nominal de cada variable. Para esto se utilizó la relación señal/ruido (SNR) que se define de la siguiente manera:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{senal}}}{P_{\text{ruido}}} \right) \quad (9)$$

donde P_{senal} y P_{ruido} son la potencia de la señal (variable medida) y del ruido adicionado respectivamente (Russ (2007)).

Para ejemplificar como varía la información de las variables con las variantes previstas en los experimentos y por lo tanto dar una idea de las exigencias a las que se somete la metodología propuesta, la Figura 5 muestra la variable que representa el desplazamiento del vástago en funcionamiento normal, en funcionamiento normal con pérdida de una variable en forma aleatoria e imputación con el valor medio de la misma en el funcionamiento normal y con las mismas condiciones anteriores añadiéndole 2% y 5% de ruido. La Figura 6 presenta la misma señal pero ahora con pérdida de información de 0 a 2 variables por observación de forma aleatoria y con 2% y 5% de ruido.

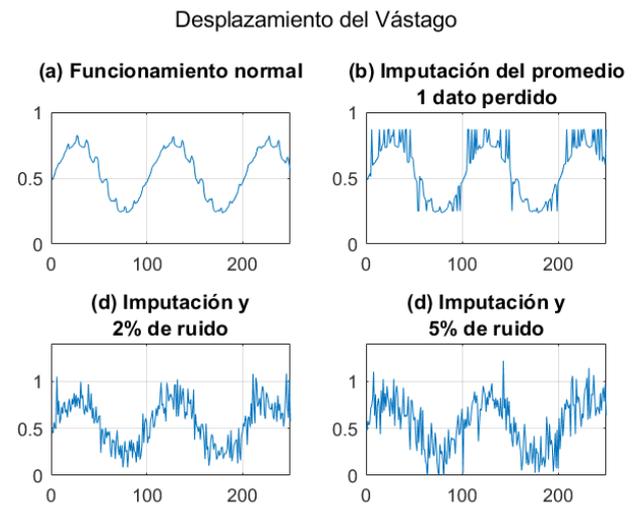


Figura 5. Señal del desplazamiento del vástago utilizada en los experimentos: a) Funcionamiento normal, b) Funcionamiento normal con pérdida e imputación de información, c) Funcionamiento normal con pérdida e imputación de información más 2% de ruido y d) Funcionamiento normal con pérdida e imputación de información más 5% de ruido

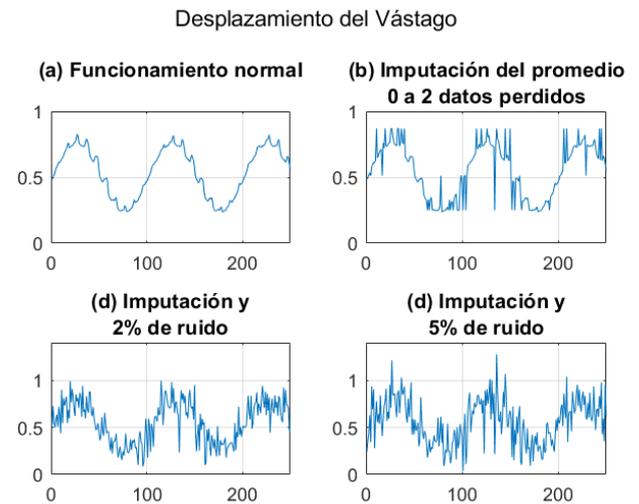


Figura 6. Señal del desplazamiento del vástago utilizada en los experimentos: a) Funcionamiento normal, b) Funcionamiento normal con pérdida de 0 a 2 variables e imputación de información, c) Funcionamiento normal con pérdida de 0 a 2 variables e imputación de información más 2% de ruido y d) Funcionamiento normal con pérdida de 0 a 2 variables e imputación de información más 5% de ruido

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados del primer experimento

La Tabla 4 presenta los resultados del primer experimento.

Como se aprecia el sistema de diagnóstico alcanza un elevado desempeño. Los mayores niveles de confusión se producen entre el Fallo 15 y el 19 lo cual se debe a una cierta superposición que existe entre las dos clases. Además el sistema no genera ninguna falsa alarma ($FAR=0\%$). Estos resultados indican un elevado nivel de robustez ante el ruido de la metodología propuesta.

Tabla 4. Matriz de Confusión para la clasificación de observaciones sin información perdida (a) Sin ruido (b) Con 2% de ruido. (c) Con 5% de ruido

(a)	F1	F12	F15	F19	F7	Normal	Acc(%)	FAR(%)
F1	393	0	0	0	0	7		
F12	0	398	0	0	2	0		
F15	0	9	391	0	0	0		
F19	0	0	22	378	0	0		
F7	4	0	0	0	396	0		
Normal	0	0	0	0	0	400		
GEN							98,167	0

(b)	F1	F12	F15	F19	F7	Normal	Acc(%)	FAR(%)
F1	396	0	0	0	0	4		
F12	0	399	0	0	1	0		
F15	0	9	391	0	0	0		
F19	0	0	20	380	0	0		
F7	4	0	0	0	396	0		
Normal	0	0	0	0	0	400		
GEN							98,417	0

(c)	F1	F12	F15	F19	F7	Normal	Acc(%)	FAR(%)
F1	397	0	0	0	0	3		
F12	0	398	0	0	2	0		
F15	0	9	391	0	0	0		
F19	0	0	18	382	0	0		
F7	3	0	0	0	397	0		
Normal	0	0	0	0	0	400		
GEN							98,542	0

3.2 Resultados del segundo experimento imputando con el valor medio

En el segundo experimento se eliminó una variable de forma aleatoria a cada observación de la base de datos. El sistema de diagnóstico al recibir cada observación primeramente realiza la clasificación de la observación según el procedimiento presentado en la sección anterior y posteriormente realiza el proceso de imputación con el valor medio de la variable perdida en esa clase.

La Tabla 5 muestra los resultados del segundo experimento.

Los resultados mostrados por la Tabla 5 vuelven a mostrar elevados niveles de desempeño y 0% de falsas alarmas que indican la satisfactoria robustez de la metodología propuesta ante la imputación por perdida de información y el ruido. Nuevamente el mayor error se produce en la clasificación del fallo 19.

3.3 Resultados del tercer experimento imputando con el valor medio

Para el experimento 3 se eliminaron de forma aleatoria entre 0 y 2 variables por observación. Cuando el sistema de diagnóstico recibe una observación, primero realiza la clasificación de la observación según el procedimiento presentado en la sección anterior y luego realiza el proceso de imputación con el valor medio de las variables perdidas en esa clase. Posteriormente se realiza la clasificación de la observación. Como en los experimentos anteriores se realizó la imputación y la posterior clasificación para las observaciones sin ruido, con ruido añadido del 2% y del 5%.

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos en el referido experimento.

Tabla 5. Matriz de Confusión para la clasificación de las observaciones con una variable perdida que es imputada con el valor medio (a) Sin ruido, (b) Con 2% de ruido, (c) Con 5% de ruido

(a)	F1	F12	F15	F19	F7	Normal	Acc(%)	FAR(%)
F1	393	0	0	0	0	7		
F12	0	400	0	0	0	0		
F15	0	9	391	0	0	0		
F19	0	0	23	377	0	0		
F7	4	1	0	0	395	0		
Normal	0	0	0	0	0	400		
GEN							98,167	0

(b)	F1	F12	F15	F19	F7	Normal	Acc(%)	FAR(%)
F1	395	0	0	0	0	5		
F12	0	400	0	0	0	0		
F15	0	9	391	0	0	0		
F19	0	0	18	382	0	0		
F7	3	0	0	0	397	0		
Normal	0	0	0	0	0	400		
GEN							98,542	0

(c)	F1	F12	F15	F19	F7	Normal	Acc(%)	FAR(%)
F1	395	0	0	0	0	5		
F12	0	400	0	0	0	0		
F15	0	9	391	0	0	0		
F19	0	0	20	380	0	0		
F7	3	0	0	0	397	0		
Normal	0	0	0	0	0	400		
GEN							98,458	0

Tabla 6. Matriz de Confusión para la clasificación de las observaciones con una cantidad aleatoria entre 0 y 2 variables perdidas (a) Sin ruido (b) Con 2% de ruido (c) Con 5% de ruido

(a)	F1	F12	F15	F19	F7	Normal	Acc(%)	FAR(%)
F1	393	0	0	0	0	7		
F12	0	398	0	0	2	0		
F15	0	10	390	0	0	0		
F19	0	0	11	389	0	0		
F7	4	0	0	0	396	0		
Normal	0	0	0	0	0	400		
GEN							98,583	0

(b)	F1	F12	F15	F19	F7	Normal	Acc(%)	FAR(%)
F1	392	0	0	0	0	8		
F12	0	399	0	0	1	0		
F15	0	9	391	0	0	0		
F19	0	0	18	382	0	0		
F7	3	0	0	0	397	0		
Normal	0	0	0	0	0	400		
GEN							98,375	0

(c)	F1	F12	F15	F19	F7	Normal	Acc(%)	FAR(%)
F1	392	0	0	0	0	8		
F12	0	398	0	0	2	0		
F15	0	9	391	0	0	0		
F19	0	0	15	385	0	0		
F7	3	0	0	0	397	0		
Normal	0	0	0	0	0	400		
GEN							98,458	0

En este experimento, se ratifica la elevada robustez de la metodología propuesta ante la presencia de variables perdidas y ruido y eso indica la excelente capacidad de generalización que logra la red neuronal LSTM.

3.4 Resultados de los experimentos 2 y 3 imputando con el valor moda

Experimentos similares a los experimentos 2 y 3 fueron desarrollados pero utilizando como método de imputación el de asignar el valor moda correspondiente a la variable que se va imputar en

la clase a la que fue asignada la observación analizada. La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 7. Resultados de % de desempeño y % de falsas alarmas utilizando como método de imputación el valor moda

Experimento	Exactitud (Acc) %	% FAR
<i>Imputación con la moda</i>		
Datos con 1 variable perdida	97,15 %	0 %
Datos con 1 variable perdida y 2 % de ruido	97,78 %	0 %
Datos con 1 variable perdida y 5 % de ruido	97,59 %	0 %
Datos con 0 a 2 variables perdidas	97,60 %	0 %
Datos con 0 a 2 variables perdidas y 2 % de ruido	98,24 %	0 %
Datos con 0 a 2 variables perdidas y 5 % de ruido	98,17 %	0 %

Los resultados alcanzados ratifican la robustez del sistema de diagnóstico propuesto.

Para saber si el método utilizado para imputar influye en los resultados que se alcanzaron, se aplicó el test estadístico no paramétrico de Wilcoxon con un nivel de significación $\alpha = 95\%$ para comparar los experimentos similares (Luengo, 2009). Los resultados obtenidos indican que no hay diferencias significativas entre los resultados lo cual indica que cualquiera de los dos métodos se puede utilizar para imputar. Solo debe tenerse en cuenta que en caso de usar el valor medio debe lograrse eliminar previamente en la base de datos de entrenamiento los datos fuera de rango.

3.5 Comparación con otros resultados presentados en la literatura científica

Para comparar con otros algoritmos presentes en la literatura científica es necesario desarrollar experimentos con características similares. En toda la literatura científica revisada son pocos los trabajos que abordan el diagnóstico de fallos en presencia de ruido e información perdida y en los encontrados los experimentos fueron desarrollados para otros tipos de sistemas que no son sistemas mecánicos.

En la Tabla 8, se presentan los resultados de técnicas de diagnóstico en sistemas mecánicos publicadas en los últimos 5 años con excelentes desempeños y en ninguno de ellos fue considerado la pérdida de información en las observaciones y solo en algunos casos fue considerado el ruido en las mediciones. Cuando se comparan esos resultados con los obtenidos en este trabajo donde además del ruido hay pérdida de información se puede comprobar que los resultados no tienen diferencias significativas lo cual indica la robustez de la metodología que aquí se ha presentado.

Tabla 8. Resultados de la comparación entre algoritmos de la literatura

Referencia	Ruido	Datos perdidos	Precisión
Li et. al. (2016)			97,68 %
Saufi et. al. (2020)	X		99,00 %
Medina et. al. (2019)			96,60 %
Lee et. al. (2019)			98,66 %
Chen et al. (2021)	X		98,46 %

4. CONCLUSIONES

Los resultados económicos, la seguridad de los operarios y el cuidado del medio ambiente son elementos de gran importancia que hay que tener en cuenta en los requisitos que debe satisfacer la industria moderna. En este trabajo, se propuso una metodología para el diagnóstico de fallos en sistemas mecánicos que consta de una etapa fuera de línea y de otra etapa en línea, que logra elevados niveles de desempeño y robustez en presencia de datos perdidos y ruido en las mediciones. La metodología propuesta realiza la imputación en línea observación a observación en caso de que haya pérdida de información en las observaciones que obtiene el sistema de adquisición de datos, supervisión y control del proceso. Esto es una ventaja con respecto a muchas de las propuestas presentes en la literatura científica donde se necesita acumular un grupo de observaciones antes de realizar la imputación. El proceso de imputación se realiza utilizando el vector de valores medios y el vector de las modas de cada variable en cada clase. Estos métodos de imputación son muy sencillos de implementar y por su baja complejidad computacional permiten su aplicación en procesos con frecuencias de muestreo elevadas, lo cual representa otra ventaja. Para el proceso de clasificación se utilizó una red neuronal de aprendizaje profundo *LSTM* la cual es entrenada en la etapa fuera de línea logrando una elevada capacidad de generalización, demostrado en los experimentos realizados donde se obtienen altos índices de clasificación satisfactoria y muy bajos porcentajes de falsas alarmas en presencia de variables perdidas y ruido.

Los resultados de la metodología propuesta fueron comparados con otras metodologías presentadas en la literatura científica actual que muestran muy altos porcentajes de desempeño satisfactorio pero que sus resultados no tienen en cuenta la pérdida de información en las observaciones. Los resultados de la comparación demostraron que no existieron diferencias significativas en los altos niveles de clasificación satisfactoria y bajos porcentajes de falsas alarmas logrados. Lo anterior indica el elevado nivel de robustez de la propuesta realizada en este trabajo y por lo tanto las ventajas que ofrece con respecto a otros métodos presentes en la literatura científica.

REFERENCIAS

- Ahmed, Q., Asif Raza, S., Al-Anazi, D.M. (2021). Reliability-based fault analysis models with industrial applications: A systematic literature review *Quality and Reliability Engineering International*, 37(4), 1397-1333. <http://dx.doi.org/10.1002/qre.2797>
- Askarian, M., Escudero, G., Graells, M., Zarghami, R., Jalali-Frahani, F., Mostoufi, N. (2016). Fault diagnosis of chemical processes with incomplete observations: A comparative study. *Computers & Chemical Engineering*, 84 104-116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.08.018>
- Aydin, I., Karakose, M., Akin, E. (2014). An approach for automated fault diagnosis based on a fuzzy decision tree and boundary analysis of a reconstruc-

- ted phase space. *ISA Transactions*, 53 220-229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2013.11.004>
- Bartys, M., Patton, R., Syfert, M., de las Heras, S., Quevedo, J. (2006). Introduction to the DAMADICS actuator FDI benchmark study *Control Engineering Practice*, 14, 577-596. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2005.06.015>
- Bishop, C.M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer-Verlag New York. ISBN: 978-0-387-31073-2.
- Camps-Echevarría, L., Llanes-Santiago, O., Silva Neto, A.J. (2010). An approach for fault diagnosis based on bio-inspired strategies *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Barcelona, Spain. <http://dx.doi.org/10.1109/CEC.2010.5586357>
- Cerrada, M., Sánchez, R., Li, C., Pacheco, F., Cabrera, D., de Oliveira, J.V., Vázquez, R.E. (2018). A review on data-driven fault severity assesment in rolling bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 99169-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.06.012>
- Cerrada, M., Sánchez, R.V., Pacheco, F., Cabrera, D., Zurita, G., Li, C. (2016). Hierarchical feature selection based on relative dependency for gear fault diagnosis. *Applied Intelligence*, 44687-703. <http://dx.doi.org/10.1007/s10489-015-0725-3>
- Chen, Y., & Li, Y. (2018). Computational intelligence assisted design: in industrial revolution 4.0. *CRC Press*.
- Chen, X., Zhang, B. and Gao, D. (2021). Bearing fault diagnosis base on multi-scale CNN and LSTM model. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(4), 971-987. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01600-2>
- Devijver, P. A., & Kittler, J. (1982) *Pattern Recognition: A Statistical Approach*. Prentice-Hall-London.
- Eren, L., Ince, T., & Kiranyaz, S. (2019). A Generic Intelligent Bearing Fault Diagnosis System Using Compact Adaptive 1D CNN Classifier. *Journal of Signal Processing Systems*, 91(2), 179-189. <https://doi.org/10.1007/s11265-018-1378-3>
- Eskelson, B.N.I., Temesgen, H., Lemay, V., Barret, T., Crookston, N.L., Hudak, A.T. (2009). The roles of nearest neighbor methods in imputing missing data in forest inventory and monitoring databases. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24(3), 235-246. <https://doi.org/10.1080/02827580902870490>
- Ger, F.A., Schmidhuber, J., Cumminns, F.(2000). Learning to Forget: continual prediction with LSTM. *Neural Computation*, 12, 2451-2471.
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory *Neural Computation*, 9, 125-138.
- Jiang, G., He, H., Yan, J., & Xie, P. (2019). Multiscale Convolutional Neural Networks for Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearbox. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(4), 3196-3207. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2844805>
- Kingma, D.P. & Lei Ba, J. (2017) ADAM: A method for stochastic optimization *arXiv:1412.6980v9 [cs.LG]* 30 Jan 2017 1-15.
- Laencina, P.J.G., Gómez, J.L.S., Vida, A.R.F. (2010). Pattern classification with missing data: a review. *Neural Computing and Applications*, 19(2), 263-282. <http://dx.doi.org/10.1007/s00521-009-0295-6>
- Lee, J. H., Pack, J. H., & Lee, I. S. (2019). Fault diagnosis of induction motor using convolutional neural network. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(15). <https://doi.org/10.3390/app9152950>
- Li, C., Cabrera, D., Sancho, F., Sánchez, R. V., Cerrada, M., Long, J., & Valente de Oliveira, J. (2021). Fusing convolutional generative adversarial encoders for 3D printer fault detection with only normal condition signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147. 107108. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107108>
- Li, C., Sanchez, R. V., Zurita, G., Cerrada, M., Cabrera, D., & Vázquez, R. E. (2016). Gearbox fault diagnosis based on deep random forest fusion of acoustic and vibratory signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 76-77, 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.02.007>
- Lin, W. C., & Tsai, C. F. (2020). Missing value imputation: a review and analysis of the literature (2006-2017). *Artificial Intelligence Review*, 53(2), 1487-1509. <https://doi.org/10.1007/s10462-019-09709-4>
- Little, R., & Rubin, D. (2014). *Statistical Analysis with Missing Data*. John Wiley & Sons.
- Liu, R., Yang, B., Zio, E., & Chen, X. (2018). Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 108 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.02.016>
- Llanes-Santiago, O., Rivero-Benedicto, B. C., Gálvez-Viera, S. C., Rodríguez-Morant, E. F., Torres-Cabeza, R., & Silva-Neto, A. J. (2018). A Fault Diagnosis Proposal with Online Imputation to Incomplete Observations in Industrial Plants. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(1), 83-98. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n1/Llanes>
- Luengo, J., García, S., Herrera, F. (2009). AA study on the use of statistical tests for experimentation with neural networks: Analysis of parametric test conditions and non-parametric tests *Expert Systems with Applications*, 36 7798-7808. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.11.041>

- Medina, R., Macancela, J. C., Lucero, P., Cabrera, D., Cerrada, M., Sánchez, R. V., & Vásquez, R. E. (2019). A LSTM Neural Network Approach using Vibration Signals for Classifying Faults in a Gearbox. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(5–8), 2195–2214. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03858-0>
- Medina, R., Macancela, J. C., Lucero, P., Cabrera, D., Li, C., Cerrada, M., Sanchez, R. V., & Vasquez, R. E. (2019). Vibration signal analysis using symbolic dynamics for gearbox fault diagnosis. *Proceedings - 2019 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control, SDPC 2019*, 208–214. <https://doi.org/10.1109/SDPC.2019.00045>
- Patan, K. (2008). *Artificial Neural Networks for the modeling and fault diagnosis of technical process*. LNCIS, 377, Springer, Berlin.
- Prieto-Moreno, A., Llanes-Santiago, O., García Moreno, E. (2015). Principal componentes selection for dimensionality reduction using discriminant information applied to fault diagnosis *Journal of Process Control*, 3314-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procont.2015.06.003>
- Raghunathan, T.E., Lepkowski, J.M., Hoewyk, J. V., Solenberger, P. (2001). A Multivariate Technique for Multiply Imputing Missing; Values usisng a Sequence of Regression Models. *Survey Methodology 27 Statistics Canada, Catalogue No. 12001*, 27(1),85-95.
- Rezamand, M., Kordestani, M., Carriveau, R., Ting, D. S. K., & Saif, M. (2020). A New Hybrid Fault Detection Method for Wind Turbine Blades Using Recursive PCA and Wavelet-Based PDF. *IEEE Sensors Journal* 20(4), 2023-2033. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2948997>
- Rivera, P.J., Serrano Mercado, E., Llanes-Santiago O., Anido Rifón, L. (2018). Modeling preventive maintenance of manufacturing process with probabilistic Boolean networks with interventions *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(8), 1941-1952. <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-016-1226-x>
- Rodríguez Ramos, A., Bernal de Lázaro, J. M., Prieto-Moreno, A., da Silva Neto, A. J., & Llanes-Santiago, O. (2019). An approach to robust fault diagnosis in mechanical systems using computational intelligence. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(4), 1601-1615. <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1343-1>
- Rodríguez Ramos, A., Domínguez Acosta, C., Rivera Torres, P. J., Serrano Mercado, E. I., Beauchamp Baez, G., Rifón, L. A., & Llanes-Santiago, O. (2019). An approach to multiple fault diagnosis using fuzzy logic. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(1), 429-439. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1256-4>
- Russ, J.C. (2007) *The image processing handbook*. CRC Press. ISBN 0-8493-7254-2.
- Saufi, S. R., Ahmad, Z. A. Bin, Leong, M. S., & Lim, M. H. (2020). Gearbox Fault Diagnosis Using a Deep Learning Model with Limited Data Sample. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(10), 6263-6271. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2967822>
- Sovilj, D., Eirola, E., Miche, Y., Björk, K.M., Nian, R., Akuso, A. (2016). Extreme learning machine for missing data using multiple imputations. *Neurocomputings*, 174, Part A(22), 220-231. <http://dx.doi.org/10.1007/s00521-009-0295-6>
- Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2017) *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. Springer, Cham
- Watanabe, K., Matsuura, I., Abe, M., Kubota, M., Himmelblau, D.M. (1989). Incipient fault diagnosis of chemical processes via artificial neural networks. *AIChE*, 35(11), 1803-1812.
- Xiao, D., Huang, Y., Zhang, X., Shi, H., Liu, C., & Li, Y. (2019). Fault Diagnosis of Asynchronous Motors Based on LSTM Neural Network. *Proceedings - 2018 Prognostics and System Health Management Conference, PHM-Chongqing 20182017*, 540–545. <https://doi.org/10.1109/PHM-Chongqing.2018.00098>
- Zhang, D., Zhang, Y., Li, Q., Vance, N., Wang, D. (2018). Robust state prediction with incomplete and noisy measurements in collaborative sensing. *Proceedings - 15th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, MASS 2018*, 460–468. <https://doi.org/10.1109/MASS.2018.00070>
- Zabiński, T., Maoczka, T., Kluska, J., Madera, M., & Sep, J. (2019). Condition monitoring in Industry 4.0 production systems - The idea of computational intelligence methods application. *Procedia CIRP*, 79, 63-67. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.012>

BIOGRAFÍAS



Francisco Javier Ortiz Ortiz. Nació en Cuenca-Ecuador en 1992. Ingeniero Electrónico por la Universidad Politécnica Salesiana en 2016. Candidato a Magíster en Electrónica y Automatización con mención en Informática Industrial por la Universidad Politécnica Salesiana. Desde el 2016 al 2018 formó parte del Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB-UPS) en la Universidad Politécnica Salesiana participando con ponencias en congresos internacionales y concursos nacionales de investigación. Actualmente se desempeña como Docente en la UEF Técnico Salesiano de la ciudad de Cuenca y como Ingeniero Electrónico en libre ejercicio.



Orestes Llanes-Santiago. Se graduó de Ingeniero Eléctrico en la especialidad de Máquinas Computadoras en la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE, en 1981. Desarrolló estudios de postgrado entre 1989 y 1994 en la Universidad de Los Andes, Venezuela, donde obtuvo el grado de Master en Ciencias en Ingeniería de Control en 1990 y el de Doctor en Ciencias Aplicadas mención Control

Automático en 1994. Actualmente es Profesor e Investigador Titular del Departamento de Automática y Computación en la CUJAE donde dirige el Laboratorio y el grupo de investigación en Estimación de Parámetros y Diagnóstico de Fallos en Sistemas Industriales. Además, es Académico Titular de la Academia de Ciencias de Cuba, Editor Jefe de la Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones (RIELAC) y editor asociado de la Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI). Sus intereses de investigación son el diagnóstico de fallos en sistemas industriales, el control no lineal, y la inteligencia computacional con aplicaciones en el control automático de procesos .

Secondary Lahars Triggered by Periglacial Melting at Chimborazo Volcano, Ecuador

Vasconez, Francisco J.^{1,*} ; Maisincho, Luis^{2,3} ; Andrade, S. Daniel¹ ; Cáceres, Bolívar² ; Bernard, Benjamin¹ ; Argoti, Cristina⁴ ; Telenchana, Edwin¹ ; Almeida, Marco¹ ; Almeida, Stefanie¹ ; Lema, Verónica¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Instituto Geofísico, Quito, Ecuador

²Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Quito, Ecuador

³Universidad Regional Amazónica IKIAM, Tena, Ecuador.

⁴Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

Abstract: Periglacial melting processes can provide the water source for secondary lahars triggered by volcanic and/or meteorological phenomena on volcanoes. Between December 2015 and April 2016, four major lahars were reported southeast of Chimborazo volcano (Ecuador). Fieldwork allowed determining the area (1.67 ± 0.37 km²), volume ($3E+05$ to $7E+05$ m³), peak discharge (100 - 150 m³/s) and mean speed (2 - 4 m/s) of these flows, which affected the local infrastructure and threatened several towns downstream (>1000 inhabitants). This case study suggests that anomalous periglacial melting could have been induced by: i) an increase in temperatures at periglacial altitudes partly ascribed to El Niño phenomenon, ii) albedo reduction of the glacier due to ash fallout from Tungurahua volcano (40 km east of Chimborazo) which erupted from 1999 to 2016 and, iii) a slight increase in internal activity at Chimborazo prior and during the lahars occurrence, as evidenced by more seismic events and thermal anomalies. These simultaneous factors could have led to the formation, outburst and/or overflow of superficial and intra-glacier ponds providing the water source to generate lahars on a dormant volcano.

Keywords: lahar (debris flow), periglacial melting, glacial outburst, El Niño phenomenon, Chimborazo volcano.

Lahares Secundarios Desencadenados por Fusión Periglacial en el Volcán Chimborazo, Ecuador

Resumen: Procesos de fusión periglacial pueden ser la fuente de agua necesaria para desencadenar lahares secundarios en volcanes ya sea por fenómenos meteorológicos y/o erupciones volcánicas. Entre diciembre 2015 y abril 2016, cuatro lahares ocurrieron al sureste del volcán Chimborazo (Ecuador). El trabajo de campo permitió determinar el área ($1,67 \pm 0.37$ km²), volumen ($3E+05$ to $7E+05$ m³), caudal máximo (100 - 150 m³/s) y velocidad media (2 - 4 m/s) de estos flujos, que afectaron la infraestructura local y amenazaron a varias comunidades aguas abajo (>1000 personas). Este caso de estudio sugiere que el derretimiento anómalo de los periglaciares del Chimborazo pudo haber sido inducido por: i) un incremento en la temperatura superficial a alturas glaciares que fue parcialmente vinculado al fenómeno de El Niño, ii) una reducción del albedo del glaciar debido a la caída de ceniza del volcán Tungurahua (40 km al Este del Chimborazo) que estuvo en erupción desde 1999 hasta 2016 y, iii) un ligero incremento en la actividad interna del Chimborazo antes y durante la ocurrencia de los lahares, evidenciado por un aumento en el número de eventos sísmicos y la aparición de anomalías termales. Estos factores de forma simultánea pudieron facilitar la formación, estallido y/o derrame de lagunas superficiales e intra-glaciales proveyendo la fuente de agua necesaria para generar lahares secundarios en un volcán sin procesos eruptivos en curso.

Palabras clave: lahares, fusión periglacial, estallido glaciar, fenómeno de El Niño, volcán Chimborazo.

1. INTRODUCTION

In Ecuador, debris flows are usually related to ongoing volcanic eruptions (e.g. Jones et al., 2015; Mothes et al., 2004; Pistolesi et al., 2014; Sierra et al., 2019). However, they occur on any type of mountains as has been observed in the Alps and the Cordillera Blanca of Peru (e.g. Ames-Márquez & Francou,

1995; Chiarle et al., 2007; Lliboutry et al., 1977; Rebetez et al., 1997). A special type of debris flows, known as lahars, are water-saturated volcanic debris and mud flows generated on the high flanks of a volcano or hill, which flow downslope driven by gravity (Vallance, 2005; Waitt, 2013; Mulas et al., 2019). According to Vallance and Iverson (2015), this phenomenon can occur: i) during a pyroclastic flow-forming

*fjvasconez@igepon.edu.ec

Recibido: 08/01/2020

Aceptado: 06/07/2021

Publicado: 31/08/2021

10.33333/rp.vol48n1.02

CC 4.0

eruption due to partial glacial melting or the disruption of a crater lake (primary lahars), or ii) by heavy rainfalls, outbursts of trapped subglacial water, extreme glacial thawing due to weather conditions and seismic events which mobilize preexisting water-saturated deposits (Barriga-López, 2015; Vasconez et al., 2017). The latter one, known as secondary lahars, are much more common and smaller in volume than the former (Jones et al., 2015). In addition, Pierson et al. (1996) described two main simplified sedimentological types of lahars, which can be distinguished according to their solid concentration: i) hyperconcentrated flows, from 20 to 60 vol% of sediments, and ii) debris flows, > 60 vol% of solid particles. Tropical glaciers can be the water-source for lahar formation related to volcanic or meteorological phenomena as was previously described. Chimborazo (6263 masl, 1.47°S, 78.81°W) is a potentially active, ice-capped volcano (Jordan and Hastenrath, 1998; Barba et al., 2008; Cáceres, 2010; Samaniego et al., 2012) located in the Ecuadorian Western Cordillera, 150 km southwest of the capital city, Quito. During the Holocene, it had at least seven eruptive periods between 8000 and 1000 BP (Barba et al., 2008). These events produced limited tephra fall, pyroclastic density currents and lahars. Based on radiocarbon records, Samaniego et al., (2012) proposed an eruptive recurrence of 1000 years, with the last eruption having taken place between the early part of the 5th

century (~AD 420) and the end of the 7th century (Barba et al., 2008). Based on deposits of these past eruptions, a hazard map of Chimborazo volcano was published in 1990 (Beate et al., 1990). In addition, three moraine groups were recognized at the high flanks of the volcano (Samaniego et al., 2012). The moraines are at the top of lava flows dated at 30±3 ka (Bablon et al., 2019) and therefore, they were formed during the Last Glacial Maximum (LGM), Younger Dryas and Neo-Glacial periods, respectively (Barba et al., 2008; Samaniego et al., 2012).

On the early morning of 1 December 2015, a secondary lahar occurred on the southeastern flank of Chimborazo without any associated rainfall. The lahar descended down the Yamborumi drainage (Figure 1, Online Resource 1), which is fed by the 13th glacier tongue and dead ice of Chimborazo at 4912 m asl, causing damage to a section of a pipeline, a bridge, roads and railway infrastructures. The flow also destroyed irrigation water channels and farmlands used for agricultural and livestock purposes. Four more similar events occurred by March 2017 (Online Resource 2), directly threatening downstream towns such as Santa Lucia de Chuquipogyos and Calshi (~1000 inhabitants) and could have also represent a potential hazard for critical infrastructure and larger cities such as San Andrés and Guano (Figure 1).

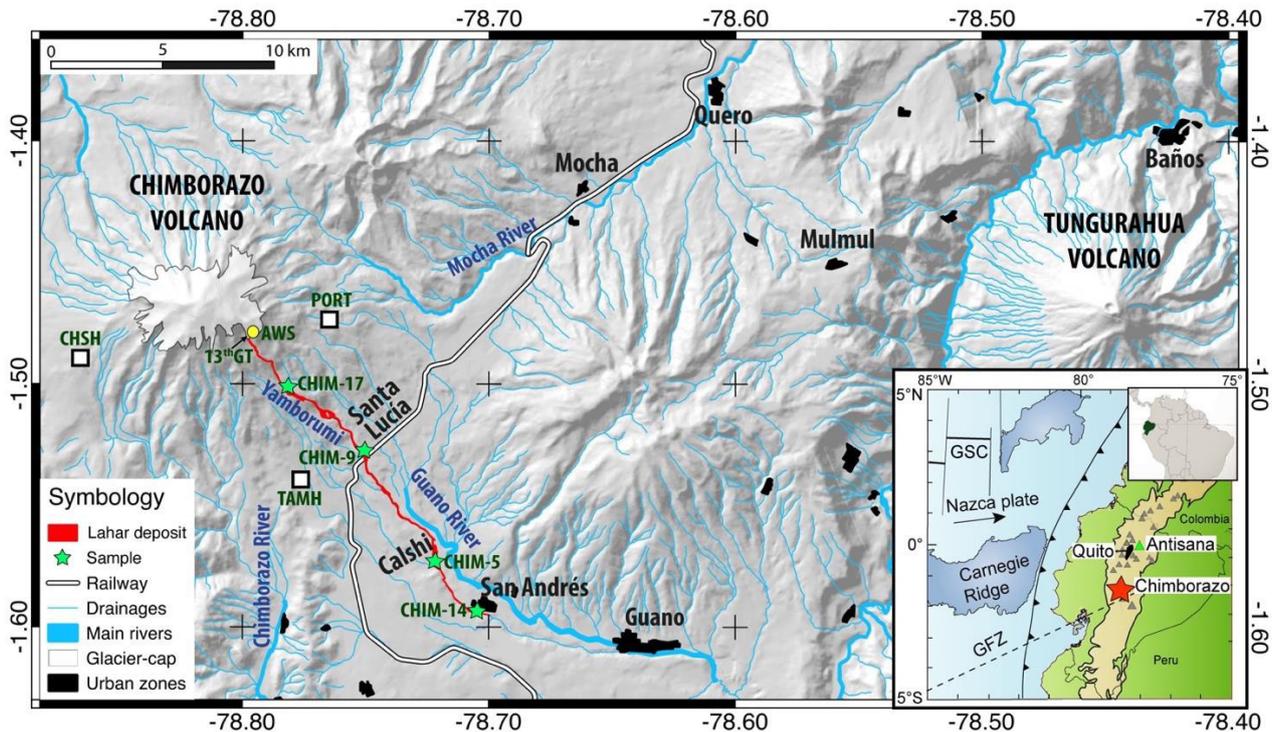


Figure 1. Map of Chimborazo and Tungurahua volcanoes with location of the 2015-2016 lahar deposits in red. White squares are seismic stations and the yellow circle is the automatic weather station (AWS) at the foot of the 13th glacier tongue of Chimborazo volcano installed in December 2016. Inset shows the main geodynamic structures, GFZ: Grijalva fracture zone, GSC: Galapagos spreading center, Quito city and Antisana and Chimborazo volcanoes.

The aim of the present manuscript is to characterize the lahars that flowed along the Yamborumi drainage and to explore some possible triggering mechanisms for periglacial melting (glacier and dead ice) which could have provided the water source for the documented lahar events.

2. METHODS AND DATA PROCESSING

During fieldwork carried out in May 2016, the bulk deposits of four lahars that occurred on 1 and 6 December 2015, 9 March and 20 April 2016, were mapped. This information allowed estimating peak discharge, mean speed, cumulative volume, grain size distribution and componentry portions. Additionally, we used meteorological (weather time-series)

and volcanological (seismic and thermal images) data, acquired by the official monitoring institutions.

2.1 Lahar characterization

Deposition (debulking) and erosion (bulking) zones were identified according to slope and lithofacies criteria, which include sedimentary structures and grain size distribution based on field observations and laboratory analyses. Additionally, 33 thickness measurements were used to estimate the cumulative volume using the Voronoi interpolation (Okabe et al., 2000). After that, the total volume was divided by four and a $\pm 50\%$ error was included. Finally, due to the lack of further quantitative information at the time of the lahar occurrence, local news reports (Online Resource 3) were used to assign a more accurate volume percentage to each individual lahar based on the damage produced. In addition, mean speed and peak discharge were estimated using the super-elevation principle in a curved channel (Costa and Williams, 1984; Pierson, 1985). Furthermore, we performed grain size distribution (GSD) analysis on the lahar matrix, from -5ϕ (32 mm) to 5ϕ ($<63\mu\text{m}$) (ASTM, 2011), for four samples spaced 4 - 5 kilometers from each other (Figure 1), in order to determine the lithofacies type in the matrix fraction according to the diagram proposed by Scott et al., (1995). Finally, componentry analysis was carried out in the most representative fraction resulting of the GSD analysis according to the methodology described by Eychenne and Le Pennec, (2012).

2.2 Data from monitoring activities

2.2.1 Meteorological factors

- At the time of lahar occurrence, no automatic weather station (AWS) had been installed at Chimborazo. The first AWS located 4430 masl at the foot of the 13th glacier tongue (Figure 1), recorded weather-time series from December 2016 to June 2017 (7 months) because of logistical and operational issues. Thus, in order to quantify weather conditions at Chimborazo before the lahars and expand the available data, meteorological data of Antisana volcano were used. Antisana (5704 masl, 0.48°S, 78.48°W) is an ice-capped volcano located 130 km to the northeast of Chimborazo (see inset in Figure 1) and its AWS is installed at 4900 masl (Maisincho, 2015). The data from Chimborazo and Antisana were compared on a monthly basis in order to find correlations between both time series.
- An orthophoto taken by the Instituto Geográfico Militar (IGM) in January 2016 and ground control points using GPS linked to the national geodetic network were used to quantify Chimborazo's ice-cap area according to the methodology proposed by the World Glacier Monitoring Service (Müller et al., 1977; Cogley, 2009). The area obtained was compared with previous measurements in order to determine the whole glacier retreat over time and the current area covered by the 13th glacier tongue of Chimborazo.

2.2.2 Volcanic factors

- Tungurahua (5016 masl, 1.47°S, 78.44°W), a stratovolcano located 40 km to the east of Chimborazo (Figure 1), erupted from October 1999 to March 2016 (IGEPN, 2018). The activity was characterized by moderate explosions which generated transient ash-clouds and sporadic pyroclastic density currents (Arellano et al., 2008; Samaniego et al., 2011; Eychenne and Le Pennec, 2012; Hall et al., 2015; Mothes et al., 2015; Hidalgo et al., 2015; Gaunt et al., 2019). The prevailing east winds (Parra et al., 2016) resulted in ash fallout in distant locations such as Quero, Mocha and Chimborazo glacier (Figure 1). On 11 November 2015, Tungurahua began a new eruptive phase producing one of the largest ash emissions since 2010 (IGEPN, 2015). Once the eruption ended, ash dispersion and accumulation on Chimborazo's glacier were estimated based on 54 ashmeter collectors (Bernard, 2013) located around the volcano (Online Resource 4). Isomass maps of this eruptive phase were obtained according to the methodologies and tools proposed by several authors (Bonadonna and Houghton, 2005; Bonadonna and Costa, 2013; Mastin et al., 2013).
- Volcanic unrests are associated with an increase in: seismic activity (number and magnitude), gas emissions, ground deformation and/or hydrothermal activity (NAS, 2017). Seismic swarms may precede eruptions (McNutt and Roman, 2015). Three seismic stations monitor Chimborazo: CHSH, PORT and TAMH, located at the volcano's western, eastern and southern flank, respectively (Figure 1). These stations have been recording seismic activity since 2014. In addition, thermal images obtained during nine overflights between 2002 and 2017 were analyzed to detect atypical superficial temperatures at the volcanic edifice.

3. RESULTS

3.1 Lahar characterization

The lahar deposits from December 2015 to April 2016 covered an area of $1.67\pm 0.37\text{ km}^2$, of which 0.8 km^2 were used as farmland and 0.3 km^2 were Andean grassland "páramo" and pine forests. The lahars flowed 18 km downstream reaching San Andrés town (2970 masl, Figure 1) with an average slope from the source of 15%.

Nine zones were defined along the Yamborumi ravine (Figure 2a) during the fieldwork, based on stream slope, lahar lithofacies and average deposit thickness. Zones 1 and 3 (Figure 2b & 2c) correspond to bulking sectors due to high slopes (35-45%) and significant channel incision. These zones were excluded from the volume estimation because the lahars flowed restricted to the narrow and steep ravine and did not leave any significant deposits. The remaining zones, 2 and from 4 to 9 are debulking sectors.

Zone 1 is the source region of these lahars. Zone 2 is a $2\text{E}+05\text{m}^2$ flat surface, where lahars deposited most of their big boulders and sediments (Figure 2b). After that, in zone 3 (Figure 2c), the lahars incised through a thick moraine deposit, reincorporating sediments, which were later on deposited in

zones 4, 5 and 6 (up to 8 km from the source). GSD from samples CHIM-17 and CHIM-9, in zones 2 and 6, respectively, show a non-cohesive debris flow behavior (Figure 3a), i.e. gravel and coarse sand matrix-supported facies without sedimentary structures and which includes blocks of up to 1-2 meters in diameter as shown in the video Online Resource 2. The maximum deposit thickness measured in these areas ranges from 2 to 4 meters (Table 1). Finally, zones

7, 8 and 9, located more than 9 km away from the source (Figure 2a), are areas where the flows lost their capacity to carry coarse debris and progressively became hyperconcentrated flows, as shown in Figure 3a (samples CHIM-5 and CHIM-14). They are characterized by fine sand matrix-supported facies with ripple structures. The thicknesses measured in here are the smallest ones (Figure 2d) between 0.5 and 0.7 meters (Table 1).

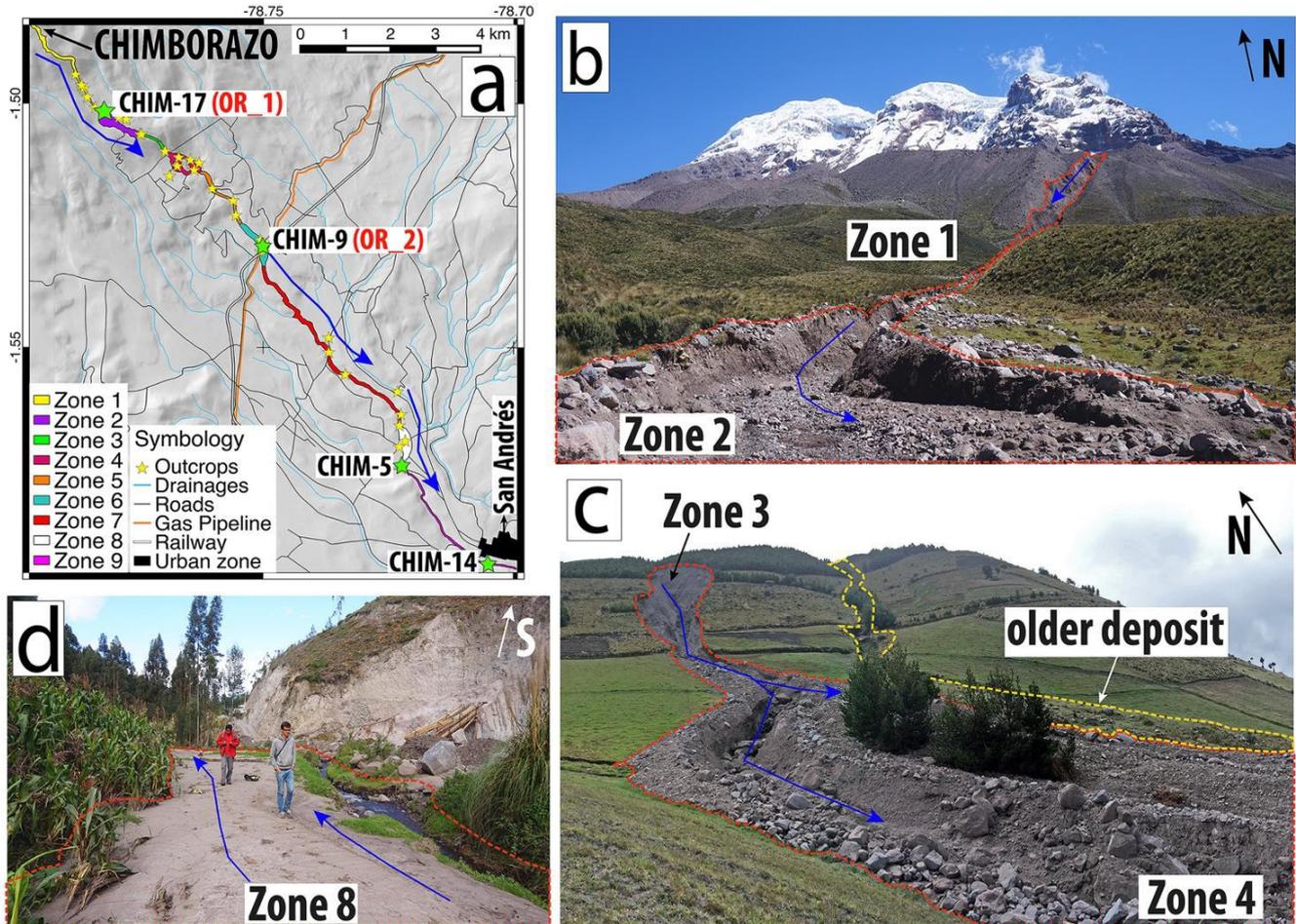


Figure 2. a) Zoning of the lahar deposit according to slope, lithofacies and average thickness criteria, b) zone 1 is the source region and zone 2 is the first deposition area, c) zone 3 is a bulking sector and zone 4 is a debulking area, where the lahars reached their maximum thickness. d) Zone 8 is a debulking area where the lahars became hyperconcentrated. Blue arrows indicate the direction of the flow and the red and yellow dashed lines the lahar edges. For online resources (OR_#) see supporting material.

Table 1. Characteristics of the nine-lahar zones. B = bulking and D = debulking.

Zone	Area (E+05 m ²)	Thickness (m)		Volume (E+05 m ³)	Type
		River-bed	River side		
1	1.87	0	0	0	B
2	2.16	2	0.5	2.56	D
3	0.42	0	0	0	B
4	1.92	4	0.7	5.04	D
5	1.12	2	0.7	1.54	D
6	1.62	3.3	0.7	2.81	D
7	4.21	2.2	0.7	5.24	D
8	1.77	1.2	0.5	1.60	D
9	1.56	1.2	0.7	1.57	D
Total	16.68			20.36	

The four major lahars in the study period have an estimated volume of 20E+05 m³, while individual ones range from

3E+05 to 7E+05 m³ (Table 2). The largest lahars occurred on 1 December 2015 and 29 April 2016, the latter being the only one accompanied by heavy rainfall, according to local reports. Peak discharges of 51-158 m³/s and average speeds of 2-4 m/s were estimated for the largest flows, whose deposits were clearly distinguishable during fieldwork.

Table 2. Volume, mean speed (MS) and peak discharge (PD) for each lahar studied.

Date (dd/mm/yy)	% of the total volume	Volume (m ³)	MS (m/s)	PD (m ³ /s)
01/12/2015	30	6E+05	4	90-100
06/12/2015	20	4E+05	-	-
09/03/2016	15	3E+05	-	-
29/04/2016	35	7E+05	2-4	51-158
Total	100	20E+05		

Finally, componentry analysis of the 2 ϕ (250 μ m) fraction, which we considered the most representative in the matrix fraction according to GSD analyses (Figure 3b), allowed identifying: 44.6% of black shiny and gray andesites and dacites, 33.6% of free crystals (pyroxene and plagioclase), 21.7% of oxidized red lithics and scoria and 0.33% of organic material (Figure 3c). These materials are thought to have been derived from the three groups of moraines described by Samaniego et al., (2012) at zones 1 and 3 (Figure 2b & 2c), and from Chimborazo’s previous pyroclastic deposits which are mainly tephra falls and surge units associated to the Holocene eruptive activity detailed in Barba et al., (2008).

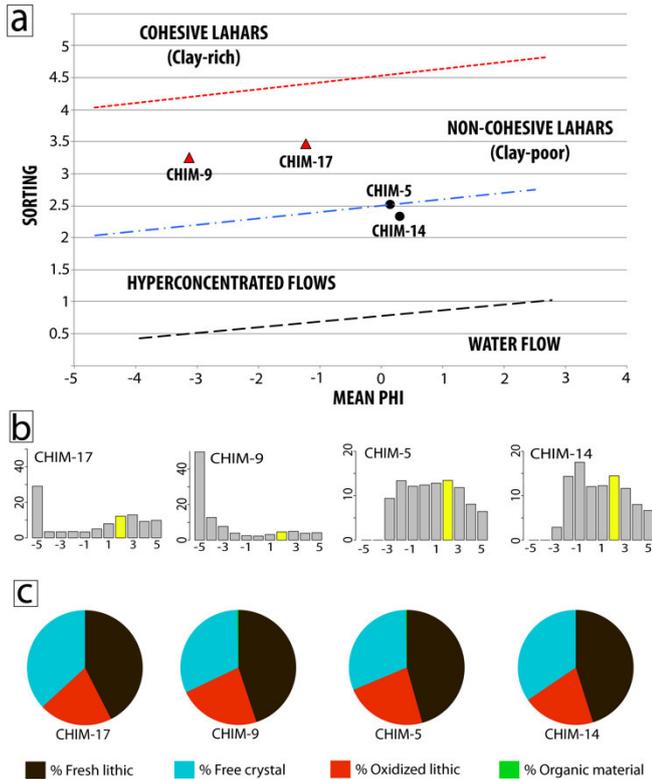


Figure 3. a) Mean grain size vs. sorting based on Scott et al. (1995), b) Grain size distribution, in yellow the chosen representative fraction and, c) componentry analysis on that chosen fraction.

3.2 Results from surveillance activities

3.2.1 Meteorological factors

Table 3 compares several meteorological data of Chimborazo’s and Antisana’s AWS during the period from December 2016 to June 2017. Incident shortwave radiation (ISR), incident longwave radiation (ILR), air temperature (T), relative humidity of the air (RH) and wind speed (WS) display high correlation (R^2) index ranging from 0.75 to 0.9 at glacier altitudes. Therefore, we assumed that Antisana’s weather time-series could be used as an approximation to assess the impact of weather fluctuations at Chimborazo at the time when the lahars occurred.

Table 3. Correlation between the meteorological parameters measured at Chimborazo and Antisana volcanoes at glacier altitudes in monthly levels. (*) shows high correlation (R^2).

Variable	Symbology	R^2
*Incident shortwave radiation	ISR	0.91
Reflected shortwave radiation	RSR	0.45
*Incident longwave radiation	ILR	0.75
Outgoing longwave radiation	OLR	0.18
*Air temperature	T	0.87
*Relative humidity	RH	0.84
*Wind speed	WS	0.75
Surface temperature	ST	0.66

Antisana’s weather station shows that the year when the lahars occurred was one of the hottest during the 2005-2015 time period (11 years). The mean temperature was 1.4°C, while temperatures in previous years lay below 1°C (Figure 4a). The increase in T and slight decrease in RH (Figure 4b) can be linked to the abrupt increase in ISR. Incident shortwave radiation reaches 494 W/m², which is 20% (82 W/m²) above the mean from 2005 to 2015 (Figure 4c). The WS (Figure 4d) also shows an increasing trend of 2m/s above the mean, reaching 6m/s in 2015. Finally, the annual cumulative precipitation (Figure 4e) shows no significant changes with values of 1045 mm/y in 2015 while the mean precipitation at glacier altitudes is 925 mm/y (Manciati et al., 2014).

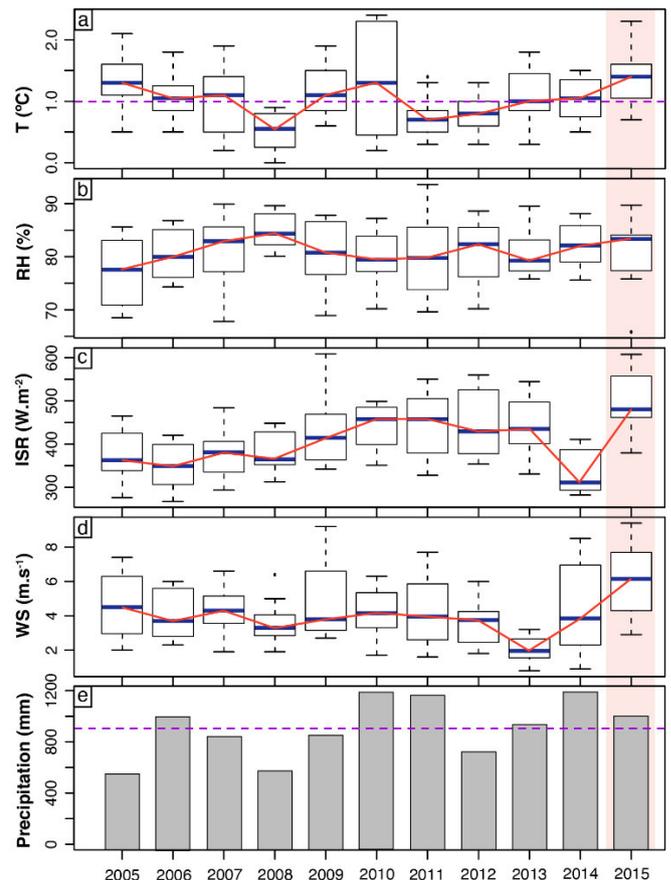


Figure 4. Evolution of the weather variables at Antisana’s glacier (4900 m asl) from 2005 to 2015. a) Air temperature (T), b) relative humidity (RH), c) incident shortwave radiation (ISR), d) wind speed (WS) and e) annual cumulative precipitation. Blue lines are the mean of the weather variables, the box is the standard deviation, the red lines show the trend over time and purple line highlights the 1.0 °C threshold and mean precipitation at glacier altitudes for comparison.

In 1962, Jordan and Hastenrath (1998) estimated a glacier cap area of 27.7 km² for Chimborazo. Cáceres (2010) calculated a reduction of 59.8% for the period from 1962 to 1997, resulting in an area of 11.82 km². Here, we estimated 7.63 km² based on an orthophoto taken in January 2016. At this time, the 13th glacier tongue covered an area of 0.28 km².

3.2.2 Volcanic factors

For Tungurahua's eruption in November 2015, we estimated that 1.83E+06 m³ of volcanic ash were released into the atmosphere based on the interpolation of cumulative ash in 54 ashmeters (purple dots in Figure 5b). These data also allowed to identify the average wind direction during the eruption, which drifted to the west, northwest and southwest (Figure 5c). Moreover, we estimated the cumulative volcanic ash to have reached <100 g/m² at the highlands of the eastern flank of Chimborazo volcano, based on kriging.

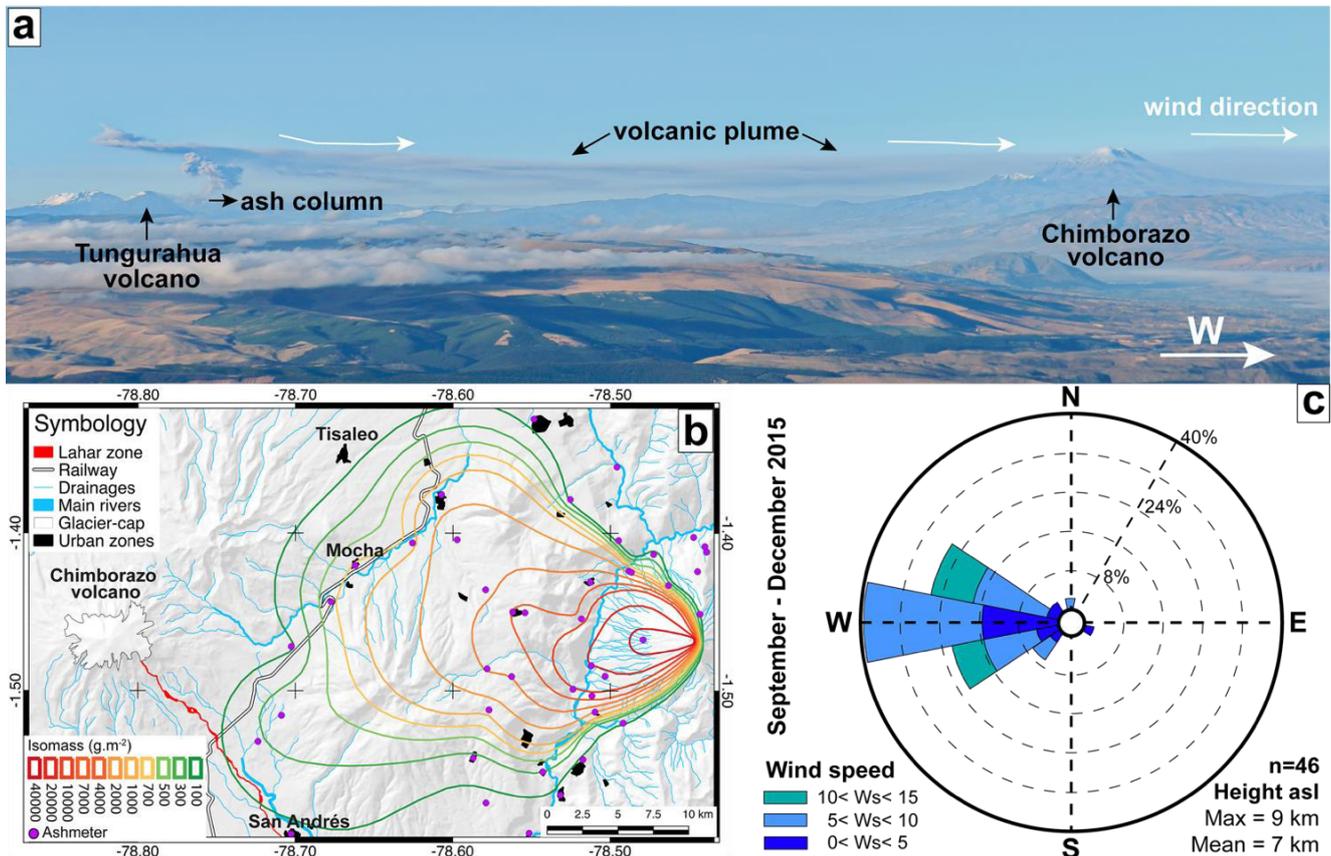


Figure 5. a) Ash emissions from Tungurahua volcano deposited on Chimborazo volcano (photo, 05/09/2013), b) isomass map of Tungurahua eruptive period September-December 2015, c) direction of ash cloud alerts of Tungurahua volcano (46) according to Washington VAAC (<https://www.ssd.noaa.gov/VAAC/ARCH15/archive.html>). Most of the volcanic plumes drifted to the west with mean speeds of 5-10 m.s⁻¹ at 7 km asl or 2 km above the crater of Tungurahua.

Figure 6a shows the cumulative number of seismic events per month from March 2014 to May 2017. At the time of the lahar occurrence, an increase in the number of events was recorded. The main peaks were observed in December 2015, March and May 2016 with 41, 27 and 36 seismic events, respectively. For comparison, before (from April 2014 to November 2015) and after lahar occurrence (since August 2016) the medians were of 2 and 7 seismic events per month. Nowadays, the seismic behavior of Chimborazo is not well-known because seismic levels are low, data recording is intermittent and unrest periods have never been reported.

In addition, the analysis of the infrared images obtained during overflights from 2002 to 2015, did not show any thermal anomalies. However, during the overflight on 20 February 2016 (2 months after the first lahar) a thermal anomaly was observed in a crevasse located in the upper southwestern flank of Chimborazo (Figure 6b). The thermal profile shows a maximum apparent temperature of 42.6°C (Figure 6c). Nonetheless, because of the location of the anomaly no correlation between the lahars and the localized heating area can be inferred.

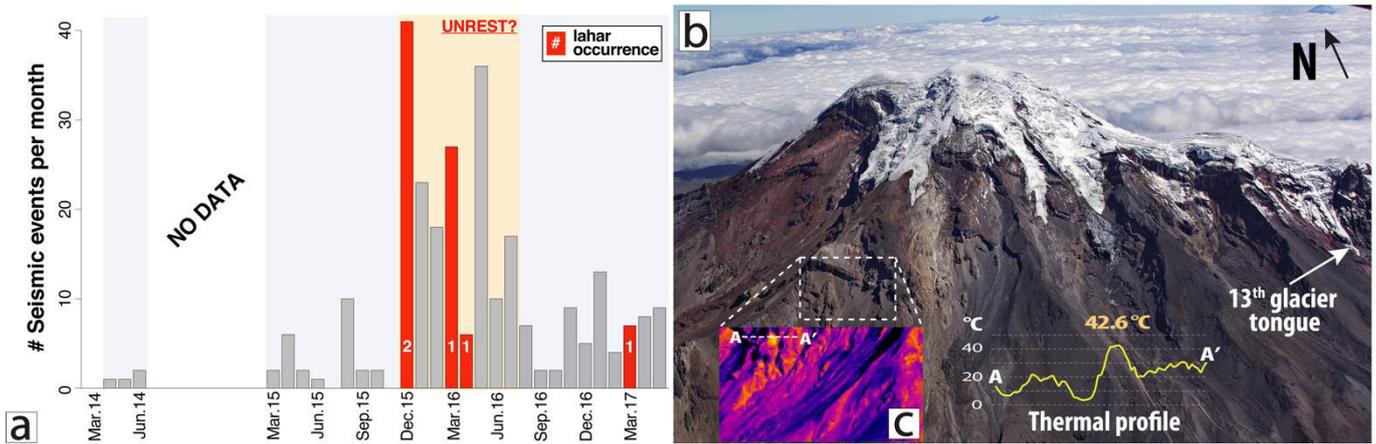


Figure 6. a) Evolution of the number of seismic events per month at Chimborazo volcano from March 2014 to May 2017 based on CHSH seismic station; red bars highlight the lahar occurrence and number of events. b) Aerial view of Chimborazo volcano showing the glaciers of the southwestern flank including the 13th glacier tongue. c) Location of the anomaly and thermal profile A-A'.

4. DISCUSSION OF THE POTENTIAL TRIGGER MECHANISMS

Meteorological temporal series show that temperature, incident shortwave radiation and wind speed reached a peak in 2015. Strong winds trigger turbulence in the atmosphere which at glacier altitudes produces sublimation of the ice/snow (Favier et al., 2004). All these factors together can cause a pronounced increase in the glacier-melting rates of Antisana and also Chimborazo volcano. In addition, during 2015, the local and regional climatology was disturbed by the ocean-atmospheric phenomenon known as El Niño (ENSO) (Barnard et al., 2017). According to Francou et al., (2004), this phenomenon causes an increase in the energy available to melt ice/snow, and a decrease in the cloud cover and therefore decrease of precipitation and RH in the Andean region. That implies higher penetration of ISR and an increase in temperature as is observed in the time-series (Figure 4). Additionally, the monthly evolution of the weather variables in 2015 show sustained increases in air temperature at Antisana with peaks of 1.7°C and 2.3°C in September and December, respectively.

Moreover, tephra accumulation on glaciers could produce albedo reduction because more solar energy is absorbed, inducing melting (Delgado-Granados et al., 2015). Schotterer et al., (2003) reported a remarkable change in Chimborazo's glacier related to ashfall from Tungurahua in 2000. The ashfall resulted in extreme melting and the formation of penitents and intra-glacier ponds at 28m depth beneath the summit. Since then, several more of Tungurahua's eruptions have affected Chimborazo's glacier (Figure 5a), including the November 2015 eruptive phase.

Despite the fact that seismic activity is not well-known at Chimborazo volcano, based on the available data, it is possible to infer that during the period from December 2015 to July 2016 a slight increase in internal activity took place at Chimborazo volcano (Figure 6).

In addition, the residents along the riversides of the Yamborumi ravine observed buoyant ice during the first lahar emplacement on 1 December 2015, while the “Cenit Mountain

Club” reported superficial water-ponds on the 13th Chimborazo glacier tongue at the end of December 2015 (Figure 7a). Additionally, during the overflight performed on 20 February 2016 some kettle holes were observed on Chimborazo's moraine deposits (Figure 7b). Therefore, we conclude that an intense periglacial melting process was ongoing at the time of the lahars occurrence on Chimborazo volcano.

Although the exact melting mechanism remains unknown, based on field observations, meteorological and volcanological evidences, we suggest that: i) the anomalous increase of energy fluxes from the atmosphere linked to ENSO phenomenon, ii) the decrease of glacier albedo due to ash accumulation from Tungurahua volcano and iii) a slight increase in internal activity at Chimborazo shown by more seismic events and thermal anomalies, could all have led to the rapid formation of superficial and intra-glacier water ponds. These, in turn, subsequently burst out incorporating moraines, providing the water and sediment sources to form secondary lahars without associated rainfall nor an eruption.

Similar trigger mechanisms have been suggested for debris flows generated at the Cordillera Blanca in Perú (Lliboutry et al., 1977b) and more recently at the Himalaya mountain range in India (Nie et al., 2021; Biswas, 2021).

Importantly, because the published hazard map from 1990 only regards hazards related to eruptive events at Chimborazo, the occurrence of these secondary, eruption-unrelated lahars prompted the elaboration of a new hazard map for Yamborumi ravine (Vasconez et al., 2016).

Finally, it seems that similar lahar events have occurred in the past near to the Yamborumi drainage, as shown in Figure 2c. Perhaps these phenomena are recurrent in other drainages of the volcano, but they were not reported because no populated areas or infrastructure were affected. In order to prevent future damage to infrastructure and populated areas, further research should focus on the source processes and/or the location of potential ponds that could burst out at Chimborazo volcano and at other Ecuadorian volcanoes.

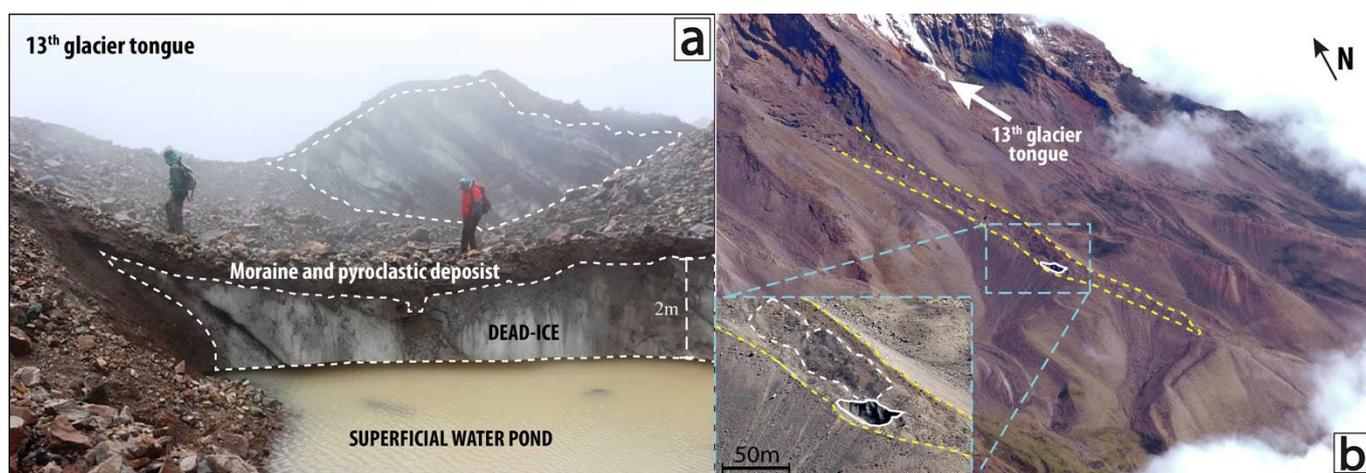


Figure 7. a) Molten dead ice at the 13th glacier tongue of Chimborazo volcano (ph. Jaime Romero), b) kettle holes detected on Chimborazo's dead ice which are covered by moraine deposits.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) and the Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) for the logistical support during the fieldwork campaigns, as well as providing volcanological and meteorological data respectively. We thank “CENIT” Mountain Club especially Jaime Romero who provided the picture displayed in Figure 7a. A special acknowledgment goes to Anais Vásconez Müller who advised in the organization of the manuscript and also to PhD. Pablo Samaniego and Naresh Rana for their suggestions. This research has been conducted in the context of IG-EPN's “Proyecto de Generación de Capacidades para la Emisión de Alertas Tempranas” funded by Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo.

Data availability

Supporting information can be found alongside the online version of this manuscript. Supporting Videos: Online Resource 1: video of the lahar at the proximal zone 2, Online Resource 2: video of the lahar at zone 6 and Supporting data: Online Resource 3: media reports of Chimborazo lahars and Tungurahua eruption in November 2015. Seismic and meteorological data recorded by IG-EPN and INAMHI can be requested for further analysis and future work at <https://www.igepn.edu.ec/> and <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>, respectively.

REFERENCIAS

- Ames-Márquez, A, Francou, B (1995). Cordillera Blanca: glaciares en la historia. *Bull. Inst. fr. études andines*. 24(1): 37-64
- Arellano, SR, Hall, M, Samaniego, P, et al (2008). Degassing patterns of Tungurahua volcano (Ecuador) during the 1999–2006 eruptive period, inferred from remote spectroscopic measurements of SO₂ emissions. *J Volcanol Geotherm Res*. 176(1):151–162. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.07.007>
- ASTM D (2011) 2487 (2006). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). Book Stand 4
- Bablon, M, Quidelleur, X, Samaniego P, et al (2019). Interactions between volcanism and geodynamics in the southern termination of the Ecuadorian arc. *Tectonophysics*. 751:54–72. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.12.010>
- Barba, D, Robin, C, Samaniego, P, Eissen, J-P (2008). Holocene recurrent explosive activity at Chimborazo volcano (Ecuador). *J Volcanol Geotherm Res* 176(1):27–35. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.05.004>
- Barnard, PL, Hoover, D, Hubbard, DM, et al (2017). Extreme oceanographic forcing and coastal response due to the 2015–2016 El Niño. *Nat. Commun*. 8:14365. <https://doi.org/10.1038/ncomms14365>
- Barriga-López, F (2015). *Historia de los desastres naturales en el Ecuador: erupciones volcánicas, terremotos, cataclismos, tsunamis, inundaciones y más*. Academia Nacional de Historia del Ecuador e Instituto Panamericano de Geografía e Historia Sección Nacional del Ecuador, Quito, Ecuador
- Beate, B, Hillebrandt, C, Hall, ML (1990). Mapa de peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Chimborazo
- Bernard, B (2013). Homemade ashmeter: a low-cost, high-efficiency solution to improve tephra field-data collection for contemporary explosive eruptions. *J Appl Volcanol*. 2:1. <https://doi.org/10.1186/2191-5040-2-1>
- Biswas, S (2021). “Hanging” glacier broke off to trigger India flood. *BBC News*
- Bonadonna, C, Costa, A (2013). Plume height, volume, and classification of explosive volcanic eruptions based on the Weibull function. *Bull Volcanol*. 75:742. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0742-1>
- Bonadonna, C, Houghton, BF (2005). Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bull Volcanol*. 67:441–456. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0386-2>
- Cáceres, B (2010). *Actualización del inventario de tres casquetes glaciares del Ecuador*. Inf Pasantía Investig En Univ Nice Sophia Antipolis
- Chiarle, M, Iannotti, S, Mortara, G, Deline, P (2007). Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps. *Glob Planet Change*. 56:123–136. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.003>
- Cogley, JG (2009) A more complete version of the World Glacier Inventory. *Ann Glaciol*. 50(53):32–38

- Costa, JE, Williams, GP (1984). *Debris-flow dynamics*. sn, <https://doi.org/10.3133/ofr84606>
- Delgado-Granados, H, Miranda, PJ, Núñez, GC, et al (2015). Hazards at Ice-Clad Volcanoes: Phenomena, Processes, and Examples From Mexico, Colombia, Ecuador, and Chile. In: *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters*. Elsevier, pp 607–646. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394849-6.00017-2>
- Eychenne, J, Le-Pennec, J-L (2012). Sigmoidal particle density distribution in a subplinian scoria fall deposit. *Bull Volcanol*. 74:2243–2249. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0671-4>
- Favier, V, Wagnon, P, Chazarin, J-P, et al (2004). One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana Glacier 15, Ecuadorian Andes. *J Geophys Res Atmospheres*. 109:D18, <https://doi.org/10.1029/2003JD004359>
- Francou, B, Vuille, M, Favier, V, Cáceres, B (2004). New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0 28' S. *J Geophys Res Atmospheres*. 109:D18. <https://doi.org/10.1029/2003JD004484>
- Gaunt, HE, Burgisser, A, Mothes, PA, et al (2019). Triggering of the powerful 14 July 2013 Vulcanian explosion at Tungurahua Volcano, Ecuador. *J Volcanol Geotherm Res*. 392. 106762. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106762>
- Hall, ML, Steele, AL, Bernard, B, et al (2015). Sequential plug formation, disintegration by Vulcanian explosions, and the generation of granular Pyroclastic Density Currents at Tungurahua volcano (2013–2014), Ecuador. *J Volcanol Geotherm Res*. 306:90–103. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.009>
- Hidalgo, S, Battaglia, J, Arellano, S, et al (2015). SO₂ degassing at Tungurahua volcano (Ecuador) between 2007 and 2013: Transition from continuous to episodic activity. *J Volcanol Geotherm Res*. 298:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.03.022>
- IGEPN (2018). Tungurahua: monitoreo térmico y cambios morfológicos del cráter. In: *VOLCÁN TUNGURAHUA Monit. Térm. Cambios Morfológicos Cráter*. <http://www.igepn.edu.ec/tungurahua-informes/20tung-campo/19943-monitoreo-termico-y-cambios-morfologicos-del-crater-24-01-2018/file>
- IGEPN (2015). Actualización de la actividad del volcán Tungurahua, N° 20. <http://www.igepn.edu.ec/tungurahua-informes/tung-especiales/tung-e-2015/13803-informe-especial-tungurahua-20/file>. Accessed 24 Jan 2018
- Jones, R, Manville, V, Andrade, D (2015). Probabilistic analysis of rain-triggered lahar initiation at Tungurahua volcano. *Bull Volcanol*. 77:68. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0946-7>
- Jordan, E, Hastenrath, SL (1998). Glaciers of South America: Glaciers of Ecuador. *US Geol Surv Prof Pap*
- Lliboutry, L, Arnao, BM, Pautre, A, Schneider, B (1977a). Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. *J Glaciol* 18:239–254
- Lliboutry, L, Arnao, BM, Pautre, A, Schneider, B (1977b). Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. *J Glaciol* 18:239–254
- Maisincho, L (2015). Analyse de la fonte glaciaire et nivale dans les Andes tropicales à partir d'un bilan d'énergie: Glacier de l'Antizana, Equateur (0° 28'S). PhD Thesis, Grenoble Alpes
- Manciati, C, Villacís, M, Taupin, J-D, et al (2014). Empirical mass balance modelling of South American tropical glaciers: case study of Antisana volcano, Ecuador. *Hydrol Sci J*. 59:8. 1519–1535. DOI: 10.1080/02626667.2014.888490
- Mastin, LG, Randall, MJ, Schwaiger, HF, Denlinger, RP (2013). User's guide and reference to Ash3d: a three-dimensional model for Eulerian atmospheric tephra transport and deposition. US Geological Survey
- McNutt, SR, Roman, DC (2015). Volcanic seismicity. In: *The Encyclopedia of Volcanoes*. Elsevier, pp 1011–1034
- Mothes, P, Hall, ML, Andrade, D, et al (2004). Character, stratigraphy and magnitude of historical lahars of Cotopaxi volcano (Ecuador). *Acta Vulcanol* 16:1000–1023
- Mothes, P, Yepes, HA, Hall, ML, et al (2015). The scientific–community interface over the fifteen-year eruptive episode of Tungurahua Volcano, Ecuador. *J Appl Volcanol*. 4:9. <https://doi.org/10.1186/s13617-015-0025-y>
- Mulas, M, Chunga, K, Leon, D.O.G., Segovia, K.F.E. (2019). Sedimentological Study of Distal Rain-Triggered Lahars: The Case of West Coast of Ecuador. 26:17
- Müller, F, Caflisch, T, Müller, G (1977). *Instructions for compilation and assemblage of data for a World Glacier Inventory*. Department of Geography, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich
- NAS (2017). *Volcanic eruptions and their repose, unrest, precursors, and timing*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/24650>
- Nie, Y, Pritchard, HD, Liu, Q, et al (2021). Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram. *Nat Rev Earth Environ* 2:91–106. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00124-w>
- Okabe, A, Boots, B, Sugihara, K, Chiu, SN (2000). *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. In: Geographical information systems. Wiley, UK
- Parra, R, Bernard, B, Narváez, D, et al (2016). Eruption Source Parameters for forecasting ash dispersion and deposition from vulcanian eruptions at Tungurahua volcano: Insights from field data from the July 2013 eruption. *J Volcanol Geotherm Res* 309:1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.11.001>
- Pierson, TC (1985). Initiation and flow behavior of the 1980 Pine Creek and Muddy river lahars, Mount St. Helens, Washington. *Geol Soc Am Bull* 96(8). 1056–1069. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96<1056:IAFBOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96<1056:IAFBOT>2.0.CO;2)
- Pierson, TC, Daag, AS, Delos Reyes, PJ, et al (1996). Flow and deposition of posteruption hot lahars on the east side of Mount Pinatubo, July–October 1991. *Fire Mud Erupt Lahars Mt Pinatubo Philipp* 921–950
- Pistolesi, M, Cioni, R, Rosi, M, Aguilera, E (2014). Lahar hazard assessment in the southern drainage system of Cotopaxi volcano, Ecuador: Results from multiscale lahar simulations. *Geomorphology* 207:51–63. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.026>
- Rebetez, M, Lugon, R, Baeriswyl, P-A (1997). Climatic change and debris flows in high mountain regions: the case study of the Ritigraben torrent (Swiss Alps). In: *Climatic Change at High Elevation Sites*. Springer, pp 139–157. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8905-5_8
- Samaniego, P, Barba, D, Robin, C, et al (2012). Eruptive history of Chimborazo volcano (Ecuador): A large, ice-capped and

hazardous compound volcano in the Northern Andes. *J Volcanol Geotherm Res* 221:33–51. DOI:10.1016/j.jvolgeores.2012.01.014

Samaniego, P, Le-Pennec, J-L, Robin, C, Hidalgo, S (2011). Petrological analysis of the pre-eruptive magmatic process prior to the 2006 explosive eruptions at Tungurahua volcano (Ecuador). *J Volcanol Geotherm Res.* 199:(1). 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.10.010>

Schotterer, U, Grosjean, M, Stichler, W, et al (2003). Glaciers and climate in the Andes between the Equator and 30° S: what is recorded under extreme environmental conditions? In: *Climate Variability and Change in High Elevation Regions: Past, Present & Future*. Springer, 15. pp 157–175. https://doi.org/10.1007/978-94-015-1252-7_9

Scott, KM, Vallance, JW, Pringle, PT (1995). *Sedimentology, behavior, and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington*. US Geological Survey

Sierra, D, Vasconez, F, Andrade, SD, et al (2019). Historical Distal Lahar Deposits on the Remote Eastern-Drainage of Cotopaxi Volcano, Ecuador. *J South Am Earth Sci* 95:102251. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102251>

Vallance, JW (2005). Volcanic debris flows. In: *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer Berlin, Heidelberg, pp 247–274. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_10

Vasconez, F, Vásconez, R, Mothes, P (2017). Reconstrucción de los flujos de lodo del volcán Carihuairazo Originados por el terremoto de 1698 Utilizando el código VolcFlow. Conference: Jornadas en Ciencias de la Tierra 8, Quito, Ecuador, p 5

Vasconez, FJ, Maisincho, L, Cáceres, B, et al (2016). Mapa de amenazas potenciales por lahares secundarios quebrada Yamborumi - volcán Chimborazo

Waitt RB (2013). Lahar. *Encycl Nat Hazards* 579–580

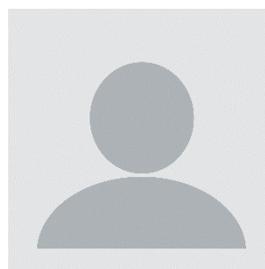
BIOGRAFÍAS



Vasconez, Francisco J. Nacido en Pujilí, el 12 de marzo de 1989. Ingeniero Geólogo de la Escuela Politécnica Nacional, promoción 2015. Se desempeña como investigador en el área de volcanología del Instituto Geofísico de la EPN. Sus líneas de investigación incluyen cuantificación de la amenaza volcánica, sensores remotos y modelamiento de fenómenos volcánicos, las cuales están soportadas por el manejo de sistemas de información geográfica. Además, Francisco se desempeña como geólogo de campo.



Maisincho, Luis. Doctor en Meteorología y Glaciología por la Université Grenoble Alpes (Francia), en la cual realizó la investigación sobre el impacto del cambio climático en los glaciares tropicales andinos en colaboración el Instituto Nacional de Meteorología (INAMHI), EPN, Instituto francés de cooperación para el Desarrollo (IRD), Laboratorio Mixto Internacional sobre Glaciares Recursos Agua en los Andes Tropicales (LMI-GREATICE) y el observatorio mundial GLACIOCLIM. Luis es contraparte del IRD, responsable del eje clima-glaciar del LMI-GREATICE, director en Ecuador del GLACIOCLIM y director del área de estudios e investigación del INAMHI. Cuenta con 8 artículos indexados, 2 sometidos y 4 capítulos en libros.



Andrade, S. Daniel. Ha recibido el grado de doctor (PhD) con especialidad en Volcanología de la Universidad Blaise Pascal de Clermont - Ferrand (Francia). Se desempeña como profesor principal de la facultad de ingeniería Geológica de la Escuela Politécnica Nacional. También es investigador del área de Volcanología del Instituto Geofísico de la EPN. En la actualidad está encargado de la jefatura del área de Volcanología del IG-EPN desde 2018.



Cáceres Correa, Bolívar. Ingeniero Civil - Ingeniero en Geología (Universidad Central del Ecuador) - Maestría en riesgos asociados a Glaciares por la Universidad Sophia Antipolis (Francia). Responsable del Área de Glaciares en el INAMHI desde el año 2000. Corresponsal nacional para WGMS. Responsable del área de estudios sobre la Criósfera en la Estación Antártica Ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado 2010-2019 (9 campañas). Publicaciones referidas a estudios sobre la Criósfera a nivel nacional e internacional. Lead Author para SROCC-IPC ciclo R6.



Bernard, Benjamin. Nacido en Chalon-sur-Saône-Francia, el 25 de septiembre de 1981. Ha recibido el grado de doctor (PhD) con especialidad en Volcanología de la Universidad Blaise Pascal de Clermont - Ferrand (Francia). Se desempeña como docente de la facultad de ingeniería Geológica de la Escuela Politécnica

Nacional. También es investigador del área de Volcanología del Instituto Geofísico de la EPN. Sus líneas de investigación son: depósitos volcánicos y dinamisismos eruptivos, historia y evolución de volcanes, y evaluación de la amenaza volcánica.



Almeida, Vaca Marco Andrés. Nacido en la Provincia de Tungurahua, el 26 de marzo de 1988. Ingeniero Geólogo de la Escuela Politécnica Nacional, promoción 2016. Se desempeña como geólogo en el área de volcanología del Instituto Geofísico de la EPN. Sus líneas de investigación se enfocan en la vigilancia de la actividad

superficial de los volcanes activos y en erupción del Ecuador Continental y las Galápagos, en cuanto a: cambios morfológicos, anomalías termográficas y emisión de fluidos, todos ellos, enfocados en la evaluación de amenaza. Así mismo, Marco se desempeña como geólogo de campo y consultor independiente.



Argoti, Cristina. Nacida en Tulcán - Ecuador, el 9 de diciembre de 1991. Ingeniera Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, promoción 2018. Actualmente se desempeña en el ámbito de la consultoría ambiental e investigación de los efectos del cambio climático en

los ecosistemas, especialmente en los glaciares y páramos de los Andes tropicales del Norte. Como parte de su área de investigación Cristina realiza actividades de campo y manejo de bases de datos en el software estadístico R.



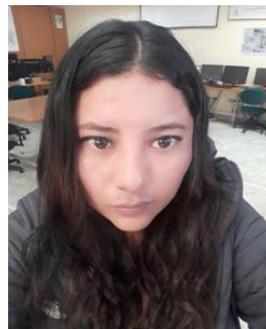
Almeida, Stefanie. Nacida en Tulcan - Ecuador, el 02 de febrero de 1991. Ingeniera Geóloga de la Escuela Politécnica Nacional, promoción 2016. Ha recibido el grado de Máster con especialidad en Riesgos Geológicos de la Universidad de Barcelona (España) en el año 2019. Se desempeñó como investigadora en

el área de Volcanología del Instituto Geofísico de la EPN. Además, ha realizado estudios en tectónica activa y paleosismología. En la actualidad se desempeña como Especialista en Geología para proyectos energéticos en CELEC-EP. Sus líneas de investigación son la geología y riesgos geológicos.



Telenchana, Edwin. Nacido en Quito-Ecuador, el 07 de abril de 1992. Ingeniero Geólogo de la Escuela Politécnica Nacional. Ha recibido el grado de Máster con especialidad en Geodinámica de la Université Grenoble Alpes (Francia). Se desempeñó como investigador en el área de

Volcanología del Instituto Geofísico de la EPN. En la actualidad se desempeña como consultor independiente. Sus líneas de investigación son la geología, geodinámica y geocronología con énfasis en la datación mediante nucleidos cosmogénicos. Otras áreas de investigación son vulcanología, geoquímica y recurrencia de erupciones volcánicas.



Lema, Verónica. Nacida en Quito, el 10 de octubre de 1986. Trabaja por más de 15 años en el Centro Terras, siendo parte del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. Se especializa en el monitoreo y análisis de señales sísmicas de origen volcánico y tectónico. Verónica es la encargada de la vigilancia sísmica de los volcanes Cotopaxi y Chimborazo. Además,

realiza turnos de monitoreo en los cuales se reporta la ocurrencia de fenómenos volcánicos y eventos tectónicos en el Ecuador continental y Galápagos.

Diseño e Implementación de Sensores Autónomos Inalámbricos para Sistemas Eléctricos de Protección Utilizando Microprocesadores de Bajo Consumo de Potencia

Barahona, Andrés¹ ; Salazar, Jaime¹ ; Soria, Mauricio¹ ; Novoa, Edison¹ ; Caina, Darwin² ; Pérez, Fabián^{1,*} 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

²Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias, Quito, Ecuador

Resumen: Este artículo presenta el diseño de un sensor autónomo para sistemas de protección eléctrica empleando tecnologías innovadoras que, para su operación, se abastecen de recursos energéticos del medio ambiente y además requieren de un bajo consumo de potencia. El prototipo posee tarjetas electrónicas que operan en cuatro etapas. La primera etapa se encarga de adquirir datos reales de corriente de un sistema eléctrico de prueba. En la segunda etapa, mediante el preprocesamiento y análisis de datos, se detectan perturbaciones en la señal de corriente del sistema eléctrico de prueba. La tercera etapa comprende la comunicación de datos por radiofrecuencia, la cual se ejecuta solo cuando su algoritmo de procesamiento ha detectado valores de corriente anormales, caso contrario, la transmisión de información se mantiene deshabilitada y con el dispositivo operando en modo de ultra bajo consumo de energía. La última etapa del sensor autónomo se encarga de proveerlo de energía mediante baterías de litio-polímero y paneles fotovoltaicos que aprovechan el uso y almacenamiento de la energía solar. Finalmente, para probar el sensor diseñado, se realizan varias pruebas de funcionamiento y se analizan los resultados obtenidos.

Palabras clave: Sensor autónomo inalámbrico, protecciones eléctricas, energía solar, dispositivos de ultra bajo consumo de potencia, comunicación con XBee S1.

Design and Implementation of Autonomous Wireless Sensors for Electrical Protection Systems Using Ultra Low Power Consumption Microprocessors

Abstract: This article constitutes the design of an autonomous sensor for electrical protection systems using new technologies that includes energy harvesting and the low power consumption of the electronic elements used. The prototype is developed in four stages. The first stage focuses on acquiring information from an external electrical system using a current sensor, that data is processed in the second stage by the development card which detects when a disturbance occurs in the current signal of the external electrical system and prioritizes the low power consumption of the devices when it is not necessary to transmit information. The third stage covers radio frequency data communication, which is executed once the processing algorithm has detected that the current exceeds the limits of normal operation, otherwise the transmission of information is disabled, and the device is in a low consumption mode. The last stage makes energy harvesting and storage of it, using solar modules, the solar radiation is harvested and transformed into electrical energy, the same that feeds the prototype, the excess energy is stored in a lithium-polymer battery, which works in absence of solar radiation. Finally, the equipment is integrated in a printed circuit board that constitutes the final prototype. To verify the correct operation of the designed sensor, many operation tests are carried out and the results obtained are analyzed.

Keywords: Wireless autonomous sensor, electrical protection, solar energy, ultra-low power consumption device, XBee S1 communication modules.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de un sistema eléctrico los transformadores de medida cumplen la función de reducir el voltaje y la corriente a niveles estándar para que el manejo de las señales eléctricas sea

seguro. Estas señales permiten operar los relés de protección y brindan información a los dispositivos de medición. En el devanado secundario de los Transformadores de Corriente (TCs) se genera una corriente proporcional y en fase a la corriente del primario, la misma que está normalizada en 1, 2

*fabian.perez@epn.edu.ec
Recibido: 21/08/2020
Aceptado: 06/07/2021
Publicado: 31/08/2021
10.33333/rp.vol48n1.03
CC 4.0

o 5 amperios. En el secundario de los Transformadores de Potencial (TPs) se tiene un voltaje proporcional al primario y está estandarizado en 120 Voltios (Ramirez, 2014).

En una subestación, las protecciones eléctricas se energizan por medio de fuentes de energía que cuentan con distintos puntos para su alimentación dentro de los llamados servicios auxiliares, entre estos están: el transformador de distribución, el terciario de un transformador de potencia, generador de emergencia o bancos de baterías (Ochoa, 2013).

Los relés de protección supervisan las señales eléctricas de un sistema en el que la información se adquiere, desde los instrumentos de medida, por medios cableados (Ochoa, 2013).

Los antecedentes mencionados implican un costo económico, un consumo energético, un espacio físico y obras civiles costosas para el cableado e implementación de los sistemas eléctricos de medición y protección. Actualmente, está en auge el uso de dispositivos de procesamiento y transmisión inalámbrica de datos con ultra bajo consumo energético puesto que permiten hacer más eficientes a los sistemas eléctricos (Caina, 2019).

A continuación, se describe el diseño e implementación de un prototipo de sensor autónomo inalámbrico de corriente que podrá utilizarse en redes eléctricas donde los tiempos de respuesta de los componentes del prototipo sean compatibles con el normal funcionamiento de los sistemas de protección eléctrica.

2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El diseño del sensor se encuentra dividido en subsistemas, los mismos que se encuentran detallados en la Tabla 1 junto con sus respectivas funciones.

Subsistemas	Funciones
Adquisición de datos	Utilizando un sensor de corriente, se obtiene la información del sistema eléctrico externo.
Procesamiento de la información	Evaluar las mediciones de corriente del sistema eléctrico externo para detectar perturbaciones en la señal. Priorizar el consumo de potencia durante la operación del prototipo.
Transmisión inalámbrica de datos	La transmisión inalámbrica de datos hacia el receptor inicia cuando se presenten valores atípicos en la onda de corriente.
Recolección de energía solar	Captar la radiación solar y convertirla en energía eléctrica. Adecuar el voltaje requerido para cargar la batería.
Almacenamiento de energía eléctrica	La energía eléctrica se recolecta en una batería que energiza al prototipo en ausencia de radiación solar.

2.1 Adquisición de datos

Se recolecta información de un sistema eléctrico de prueba mediante un medidor de corriente que genera una señal de salida analógica de voltaje proporcional al valor de la corriente medida. El microcontrolador (MCU) evalúa los datos para

determinar si el sistema eléctrico externo opera dentro de los límites normales de corriente.

- Sensor de corriente de efecto Hall

La corriente de operación del sistema eléctrico externo es superior a la corriente del sensor autónomo, debido a esto los sistemas se encuentran eléctricamente aislados, para lo cual se utiliza el sensor de efecto Hall LTS 15-NP que proporciona una salida instantánea con gran precisión, alta inmunidad a interferencias y un ancho de banda de 100 kHz. El sensor tiene configuraciones para medir corrientes de 5A, 7,5A, 15A (LEM, 2017).

Para el prototipo el ancho de banda corresponde también a los 100 kHz; valor notablemente superior al de los transformadores de corriente tradicionales.

- Diodo Zener

Para proteger el sensor de corrientes de sobrevoltajes generados por los paneles fotovoltaicos se utiliza el diodo Zener 1N4733, el cual actúa cuando el voltaje supera los 5,1V (VISHAY, 2003). En la Figura 1, se muestra el circuito implementado.

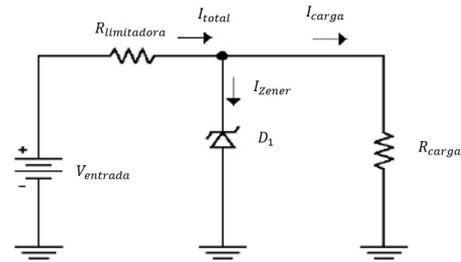


Figura 1. Circuito implementado para el diodo Zener (Mijarez, 2014)

El exceso de voltaje se disipa utilizando una resistencia limitadora, la misma que se calcula con la Ecuación (1) (Mijarez, 2014), para lo cual se utiliza el valor máximo de voltaje generado por los paneles fotovoltaicos y la menor corriente que fluye en el diodo Zener.

$$R_{lim} = \frac{V_{entrada} - V_{D1}}{I_{Zener} + I_{carga}} \tag{1}$$

$V_{entrada}$: voltaje de la fuente (V), V_{D1} : voltaje en el diodo Zener (V), I_{Zener} : corriente del diodo Zener (A), I_{carga} : corriente del sensor (A), R_{lim} : resistencia limitadora (Ω).

$$R_{lim} = \frac{6V - 5,1V}{(28 + 1) mA} = \frac{0,9V}{29 mA} = 31 \Omega \Rightarrow R_{lim} = 33\Omega$$

2.2 Procesamiento de la información

El elemento inteligente del prototipo lo conforma la tarjeta MSP430-EXPFR5969, la cual es muy utilizada en aplicaciones que requieren muy bajo consumo de potencia (Texas Instruments, 2015). La tarjeta incluye un conversor analógico-digital (ADC) que se utiliza para adquirir la señal entregada por el sensor de corriente y el voltaje generado por los módulos solares. Además, la tarjeta cuenta con un módulo de comunicación serial asincrónica – UART que se utiliza para transmitir la información al dispositivo emisor de

comunicación por radiofrecuencia cuando se detecta anomalías en la señal de corriente del sistema eléctrico de prueba.

La tarjeta de desarrollo posee modos de operación con diferentes niveles de consumo en los que se desactivan funciones del microcontrolador cuando no se las utiliza (Texas Instruments, 2017). Por ejemplo, en el prototipo desarrollado el microcontrolador deja su modo de bajo consumo mientras recibe y evalúa los datos que proporciona el sensor de corriente.

En la Figura 2, se detalla el diagrama de flujo del algoritmo implementado, en el que destacan las siguientes funciones: adquirir 20 muestras por cada ciclo de la señal de corriente; almacenar la información de los últimos dos ciclos; detectar perturbaciones en la señal; determinar valores máximos y medir el valor eficaz de corriente del sistema eléctrico de prueba; determinar cuándo se realiza la transmisión de información y habilitar la carga de la batería cuando se disponga del voltaje suficiente en los módulos solares.

2.3 Transmisión inalámbrica de datos

Se utiliza módulos XBee Serie 1, debido a sus esquemas de bajo consumo de energía, además que permiten formar redes de sensores con una comunicación confiable (DIGI, 2018). La transmisión inalámbrica de datos se realiza entre el prototipo y el computador que, para este caso, simulará la operación de un relé de protección. Los módulos de comunicación XBee S1 se configuran para trabajar en el modo de bajo consumo, llamado sueño ligero, ya que el mismo dispone de 2,6 ms para despertar y su consumo de corriente es menor a 50µA (DIGI, 2018).

- Configuración de la tarjeta XBee S1

La configuración para establecer comunicación entre los módulos de radiofrecuencia se realiza utilizando el software XCTU. En la Tabla 2, se especifica la configuración de las variables en cada uno de los módulos.

Tabla 2. Parámetros modificados utilizando XCTU

Parámetros	XBee emisor	XBee receptor
PAN ID	9032	9032
DH	0	0
DL	1	0
MY	0	1
CE	0	0
PL	4	4
SM	2	2
BD	115200	115200
Bits de datos	8	8
Paridad	Ninguna	Ninguna
Bits de parada	1	1
Control de flujo	Ninguno	Ninguno

2.4 Recolección de energía solar

Con la tecnología actual se puede recolectar energía proveniente de distintas fuentes existentes en el medio ambiente; la cantidad de potencia por unidad de área que se genera en cada caso es distinta y se resume en la Tabla 3.

Tabla 3. Energía recolectada de distintas fuentes (Catalán López, 2013)

Tipo de Energía	Fuente de energía	Potencia generada
Solar	Interior	10 µW/cm ²
	Exterior	10 mW/cm ²
Térmica	Humano	25 µW/cm ²
	Industria	1 – 10 mW/cm ²
Mecánica	Humano	4 µW/cm ²
	Industria	100 µW/cm ²
Radiofrecuencia	Comunicación (GSM)	0,1 µW/cm ²
	Wi-Fi	1 µW/cm ²

Para la implementación del prototipo se seleccionó la energía solar, ya que se puede recolectar mayor cantidad de potencia, en instalaciones exteriores, en comparación con los otros tipos de energía mencionados en la Tabla 3.

- Estimación del consumo de energía

Para dimensionar el número de módulos fotovoltaicos se necesita estimar el consumo de potencia de todos los elementos que constituyen el prototipo, para ello se consideró dos estados de operación, cuando transmite y cuando no transmite información, como se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4. Consumo de potencia del sensor autónomo

Elemento	Consumo sin transmisión de datos (mW)	Consumo con transmisión de datos (mW)
Sensor de corriente	115	115
Microcontrolador MSP430FR-5669	12,5	13,3
XBee S1	0,13	165,6
Total	128	294

Posterior a lo mencionado, se calcula el consumo de energía diario del prototipo de acuerdo con el tiempo de operación en cada uno de sus estados, como lo muestra la Tabla 5.

Tabla 5. Energía diaria consumida

Estado	Potencia (W)	Tiempo de funcionamiento al día	Energía total necesaria (Wh/día)	Energía total (con margen del 25%) (Wh/día)
Sin transmisión de información	0,1536	23 horas 45 minutos	3,648	4,56
Con transmisión de información	0,3528	15 minutos	0,0882	0,11

La energía total se ha calculado con un 25% de energía de reserva adicional a fin de superar algún imprevisto meteorológico que afecte la recolección del recurso solar. El porcentaje de reserva de energía podría variar según el sitio de instalación del prototipo y en algunos casos podría no requerirse.

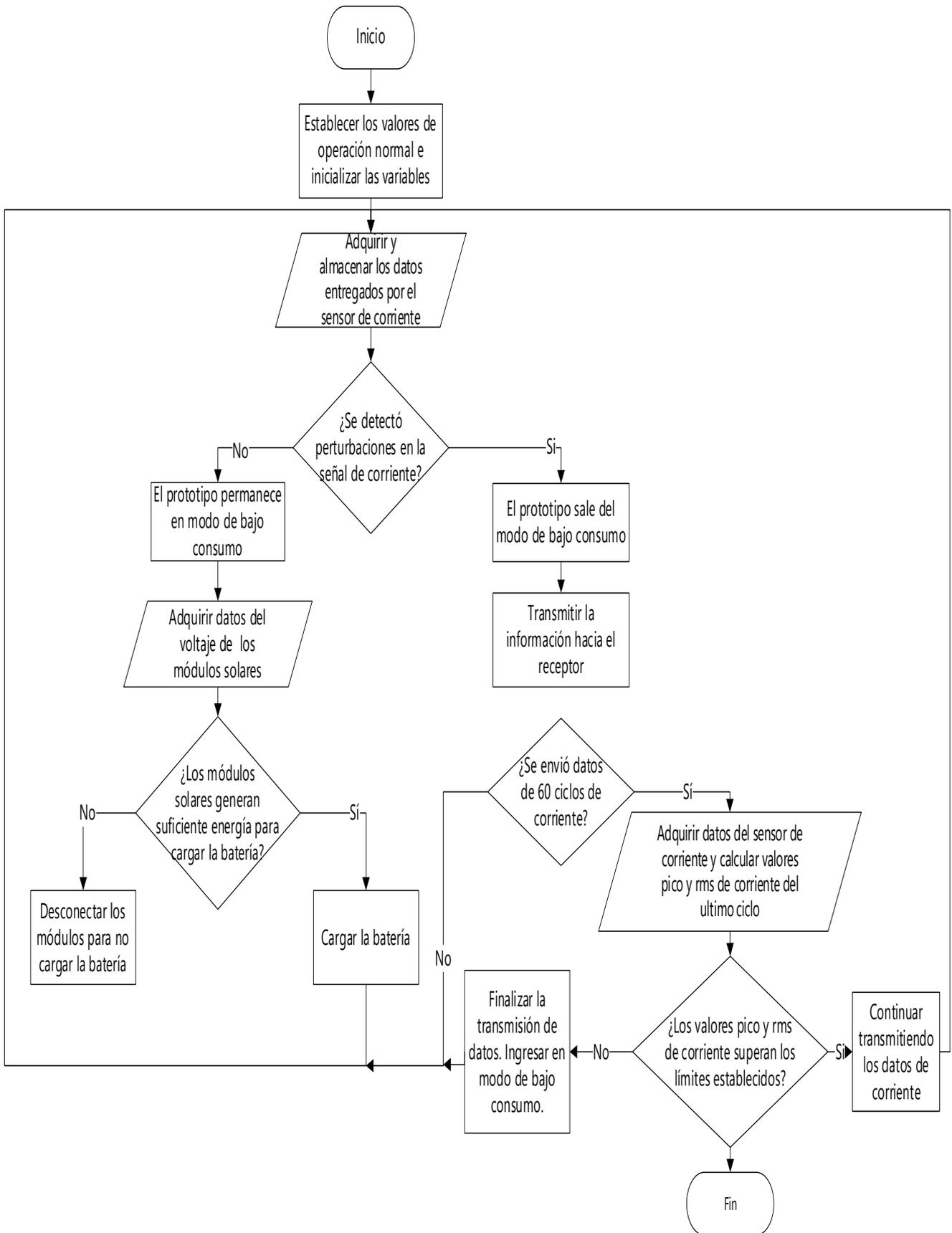


Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo de procesamiento de datos

El tiempo de funcionamiento para cada uno de los estados se estableció considerando que la información se transmite solo cuando aparecen perturbaciones en la onda de corriente. La mayoría del tiempo no se transmite información.

Se calcula el consumo diario promedio de las cargas DC sumando los consumos de energía cuando el prototipo transmite datos y también cuando no lo hace, como se muestra en la Ecuación (2) (Alonso, 2016).

$$E_{cmd\ DC} = E_{transmitiendo} + E_{No\ transmitiendo} \quad (2)$$

$$E_{cmd\ DC} = (4,56 + 0,11)Wh/día = 4,67\ Wh/día$$

Para la determinación del número de módulos fotovoltaicos se considera una eficiencia teórica del 95% en los elementos de almacenamiento y un rendimiento del 100% en los conductores. Con la Ecuación (3) se obtiene el consumo diario promedio de energía (Alonso, 2016).

$$E_{cmd} = \frac{E_{cmd\ DC} + \frac{E_{cmd\ AC}}{\eta_{inversor}}}{\eta_{bateria} \times \eta_{conductor}} \quad (3)$$

E_{cmd} : consumo diario promedio de energía (Wh/día), $E_{cmd\ DC}$: consumo diario promedio de cargas que consumen energía continua (Wh/día), $E_{cmd\ AC}$: consumo diario promedio de cargas que consumen energía alterna (Wh/día), $\eta_{inversor}$: rendimiento del inversor, $\eta_{bateria}$: eficiencia de la batería, $\eta_{conductor}$: eficiencia de los conductores.

El prototipo no cuenta con cargas AC, por tal motivo las componentes $E_{cmd\ AC}$ y $\eta_{inversor}$ no se consideran en el cálculo. Reescribiendo la Ecuación (3), se tiene:

$$E_{cmd} = \frac{E_{cmd,DC}}{\eta_{bateria} \times \eta_{conductor}} = \frac{4,67Wh/día}{0,95 \times 1} = 4,92\ Wh/día$$

Con el valor del consumo diario promedio de energía se calcula la energía total anual (E_T) que consume el prototipo, como se muestra en la Ecuación (4) (Alonso, 2016):

$$E_T = E_{cmd} \times 365\ días \quad (4)$$

$$E_T = 4,92 \times 365 = 1\ 795,8\ Wh/año = 1,7958\ kWh/año$$

El valor total de energía anual permite conocer el consumo energético anual del prototipo y compararlo con el consumo que podría demandar de la red eléctrica, como se indica en la Ecuación (5) (Alonso, 2016). Conociendo que el costo del kWh en Quito, en bajo voltaje, es de 0,083USD, se puede analizar el ahorro obtenido al implementar el prototipo (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2019).

$$C_{anual} = E_T \times tarifa \quad (5)$$

$$C_{anual} = 1,7958\ kWh/año \times 0,083\ USD/kWh$$

$$C_{anual} = 0,15\ USD/año$$

Cuando el prototipo opera en el estado de bajo consumo, existe una reducción económica y energética aun cuando se encuentra transmitiendo datos. Para comprobarlo se realizan los mismos cálculos, pero ahora se mantiene el estado de transmisión de información las 24 horas, como lo muestra la Tabla 6.

Tabla 6. Energía consumida diariamente transmitiendo información

Estado	Potencia (W)	Tiempo de funcionamiento al día	Energía total necesaria (Wh/día)	Energía total necesaria con margen de seguridad (25%) (Wh/día)
Con transmisión de datos	0,3528	24 horas	8,4672	10,584

Desarrollando los cálculos explicados anteriormente:

$$E_{cmd\ DC2} = 10,584\ Wh/día$$

$$E_{cmd2} = \frac{E_{cmd,DC2}}{\eta_{bateria} \times \eta_{conductor}} = \frac{10,584\ Wh/día}{0,95 \times 1}$$

$$E_{cmd2} = 11,141\ Wh/día$$

$$E_{T2} = 11,141\ Wh/día \times 365\ días = 4066,5\ Wh/año$$

$$E_{T2} = 4,0665\ kWh/año$$

$$C_{anual2} = 4,0665\ kWh/año \times 0,083\ USD/kWh$$

$$C_{anual2} = 0,34\ USD/año$$

Se calcula el porcentaje de reducción de energía anual consumida mediante la Ecuación (6) (Rustom, 2012).

$$P_{reducción} = \frac{E_{T2} - E_T}{E_{T2}} \times 100\% \quad (6)$$

$$P_{reducción} = \frac{4,0665 - 1,7958}{4,0665} \times 100\% = 55,84\%$$

Al permanecer en modo de bajo consumo se disminuye en un 55,84% la energía total consumida en un año por el prototipo; lo que a su vez disminuye el costo energético del prototipo.

- Cálculo de la cantidad de módulos solares

Para dimensionar el número de módulos solares se utiliza el valor de radiación solar, en el lugar que se implementa el prototipo, en este caso Quito-Ecuador. La información se obtiene del Atlas Solar del Ecuador elaborado por la ARCONEL.

El número de módulos fotovoltaicos necesarios para la energización del prototipo se calcula con el valor de radiación

del mes más crítico, que es el mes de menor radiación solar en el sitio de instalación ($Radiación_{mes-crítico}$) (Abella, 2012). Con el valor de radiación crítica se determina la hora solar pico (HPS) que es la unidad que mide la radiación que proviene del sol cuando se tiene una radiación solar hipotética constante de $1000 W/m^2$, como se muestra en la Ecuación (7), (Alonso, 2016).

$$HPS_{CRÍTICO} = \frac{Radiación_{mes-crítico}}{1000 [Wh/m^2]} \quad (7)$$

$$HPS_{CRÍTICO} = \frac{4925 Wh/m^2/día}{1000 W/m^2} = 4,925 HPS$$

De la misma forma se calcula el consumo energético diario en amperio hora (E_{Ah}), el mismo que se obtiene de la Ecuación (8) (Alonso, 2016). Se utilizó baterías de 3,7 V puesto que es el voltaje al que trabajan los elementos del prototipo.

$$E_{Ah} = \frac{E_{cmd}}{V_{bat}} \quad (8)$$

$$E_{Ah} = \frac{4,92 Wh/día}{3,7 V} = 1,33 Ah/día$$

Por último, se calculó la corriente generada por los módulos fotovoltaicos en las condiciones del mes crítico (I_G) (Alonso, 2016), la cual se obtiene a través de la Ecuación (9):

$$I_G = \frac{E_{Ah}}{HPS_{crítico}} \quad (9)$$

$$I_G = \frac{1,33 Ah/día}{4,925 HPS} = 0,27 A$$

Al conectar los módulos fotovoltaicos en paralelo se aumenta la corriente producida (CIRCE, 2015). Este valor se obtiene dividiendo I_G para la máxima corriente de los módulos solares (I_{max}), la cual es proporcionada por el fabricante y es de 0,2 A (IXYS, 2018). Con la Ecuación (10) se obtiene el número de módulos solares requeridos (Alonso, 2016):

$$N_{módulos} = \frac{I_G}{I_{max}} \quad (10)$$

$$N_{módulos} = \frac{0,27 A}{0,20 A} = 1,35 módulos$$

$$N_{módulos} = 2 módulos$$

2.5 Almacenamiento de energía eléctrica

La energía que se ha recolectado de los módulos fotovoltaicos se almacena en baterías recargables con el objetivo de brindar una autonomía energética al sensor cuando no se tenga radiación solar o ésta sea insuficiente. Dicha autonomía está directamente relacionada con la capacidad de la batería.

- Dimensionamiento de la batería

La capacidad de la batería depende de la cantidad de días que se desee que el prototipo funcione sin recibir energía solar. El tiempo que se ha escogido es de dos días, el mismo que se considera adecuado hasta que los módulos fotovoltaicos vuelvan a captar radiación fotovoltaica. En la Ecuación (11) se calcula la capacidad de la batería (Alonso, 2016):

$$C_{bat} = \frac{E_{cmd} \times N}{p_{desc} \times V_{bat}} \quad (11)$$

C_{bat} : capacidad de almacenamiento de la batería (Ah), E_{cmd} : consumo diario promedio de energía ($Wh/día$), N : tiempo en días que se desee para autoabastecimiento del prototipo, p_{desc} : profundidad de descarga de la batería, en las baterías de litio este factor es del 0,9, V_{bat} : voltaje en el que funciona la batería (V).

$$C_{bat} = \frac{4,92 Wh/día \times 2}{0,9 \times 3,7 V} = 2,954 Ah$$

Se selecciona una batería de 3 Ah debido a que es un equipo fácil de encontrar en el mercado. El material de este acumulador es de litio-polímero ya que presenta algunas características importantes como: una mayor vida útil, posee una descarga lineal, mayores ciclos de carga y descarga, no presenta el efecto memoria, que es el efecto que reduce su capacidad por cargas incompletas y se puede almacenar mayor cantidad de voltaje que en otros tipos de baterías (J&A, 2012).

Gracias a la Ecuación (10) se obtuvo que se necesitan dos módulos solares en paralelo, pero, además, se debe conocer el tiempo de carga de la batería cuando ésta se encuentre descargada totalmente, este tiempo se lo obtiene mediante la Ecuación (12) (Alonso, 2016):

$$tiempo_{carga} = \frac{C_{bat}}{I_{max}} \quad (12)$$

Con dos módulos solares el tiempo de carga de la batería es:

$$tiempo_{carga} = \frac{3000 mAh}{(200 + 200) mA} = 7,5 horas$$

Este valor de 7,5 h es alto debido a que, si bien se tiene 12 horas hipotéticas de energía solar por día, las que son realmente útiles son de 10 am a 4pm, en total 6 horas. Por lo que se aumenta un módulo fotovoltaico adicional, para que este tiempo de carga disminuya, por lo que con 3 módulos solares se tiene:

$$tiempo_{carga} = \frac{3000 mAh}{(200 + 200 + 200) mA} = 5 horas$$

Se tiene un tiempo de 5 horas para cargar la batería cuando ésta se encuentre totalmente descargada y los módulos solares se encuentren produciendo su corriente nominal de 200 mA.

- *Regulador de carga*

El regulador de carga permite una carga eficiente de la batería y evita que el acumulador de energía opere en situaciones dañinas en las que se ven afectadas sus propiedades físicas.

Para el dimensionamiento y selección del regulador que se ajuste a las necesidades del sensor autónomo se requiere la corriente de entrada máxima que llega al regulador, la Ecuación (13) (Alonso, 2016) permite obtener este valor:

$$I_{entrada} = f_{seguridad} \times I_{max} \times N_{paralelo} \quad (13)$$

$I_{entrada}$: entrada de corriente al regulador (A), $f_{seguridad}$: se selecciona un 25% adicional por seguridad, I_{max} : corriente nominal a los que funcionan los módulos solares (A), $N_{paralelo}$: número de módulos solares conectados en paralelo.

$$I_{entrada} = 1,25 \times 200mA \times 3 = 900 mA = 0,9 A$$

Además, para calcular la corriente de salida del regulador se utiliza la Ecuación (14) (Alonso, 2016):

$$I_{salida} = \frac{f_{seguridad} \times \left(P_{DC} + \frac{P_{AC}}{\eta_{inversor}} \right)}{V_{batería}} \quad (14)$$

I_{salida} : salida de corriente del regulador (A), P_{DC} : potencia DC requerida por las cargas (W), P_{AC} : potencia AC requerida por las cargas (W), $\eta_{inversor}$: eficiencia del inversor.

$$I_{salida} = \frac{1,25 \times (0,1476 W + 0,3336 W)}{3,7 V} = 0,162 A$$

Se escogió el regulador de carga WeMos D1 Mini TP5410 debido a que es un elemento que se ajusta a las corrientes de entrada y salida calculadas y posee la característica que trabaja de una manera eficiente con las baterías de litio.

- *Convertor DC-DC elevador*

La utilización de un convertor DC-DC elevador mejora la autogestión energética del sensor autónomo puesto que, para cuando el voltaje generado por los módulos fotovoltaicos sea menor a 5V, este elemento eleva el voltaje y lo mantiene constante. Se elige un convertor elevador comercial que cumple con los requerimientos necesarios, el cual tiene la numeración MT3608 (AEROSEMI, 2015).

- *Convertor DC-DC reductor*

Se utilizó un convertor DC-DC reductor para ajustar los voltajes a los que opera la tarjeta MSP430-EXPFR5969 y los módulos XBee que es de 3,1 V lo que mejora el bajo consumo de potencia del prototipo. La numeración del convertor reductor comercial utilizado es XL4015 (XLSEMI, 2017).

- *Conexión y desconexión de módulos solares*

En los módulos fotovoltaicos se desea evitar la circulación de corriente inversa, es decir del prototipo a los módulos fotovoltaicos, por lo que es necesario desconectar los módulos del regulador de carga cuando no generen energía eléctrica. La utilización de diodos Schottky no es una opción válida debido a que existe una caída de voltaje de 1 V cuando circula 0,2 A por cada módulo solar (VISHAY, 2017). Por lo que se implementó un arreglo optoacoplador – MOSFET que reduce dicha caída de voltaje a 0,4 V y realiza la conexión y desconexión de paneles fotovoltaicos por medio del elemento inteligente del prototipo.

El microcontrolador conecta y desconecta los módulos solares, por lo que éste se informa el voltaje existente en los módulos fotovoltaicos por medio de un divisor de voltaje resistivo que reduce el voltaje al nivel de operación de la tarjeta de desarrollo y ésta lo recibe por medio de su convertor ADC. Se utiliza un potenciómetro de 100 kΩ y el valor de las resistencias se obtiene a través de la Ecuación (15) (Velasco, Soler, & Botina, 2016).

$$V_{salida} = V_{entrada} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (15)$$

V_{salida} : tensión de salida (V), $V_{entrada}$: tensión de entrada (V), R_1 y R_2 : resistencias (Ω).

$$\frac{3V}{6V} = \frac{R_2}{100 k\Omega}$$

$$R_2 = 50 k\Omega ; R_1 = 50 k\Omega$$

En la Figura 3, se observa el arreglo entre el optoacoplador y el MOSFET.

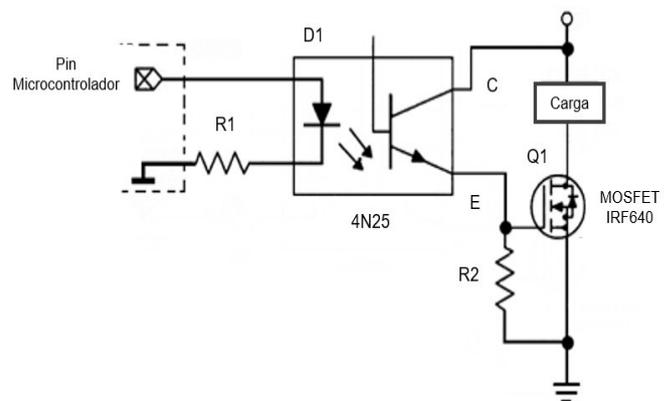


Figura 3. Arreglo optoacoplador-MOSFET

El optoacoplador evita problemas de referencia de la señal proveniente del microcontrolador cuando se conecta y desconecta los módulos solares, con la Ecuación (16) se dimensiona la resistencia que limita la corriente del LED en la entrada del optoacoplador, para que ésta sea de 2×10^{-3} A (Toshiba, 2018).

$$R_1 = \frac{(V_{entrada} - V_f)}{I_f} \quad (16)$$

$R1$: resistencia de entrada para limitar corriente (Ω), $V_{entrada}$: voltaje de entrada (V), V_f : voltaje del indicador LED (V), I_f : corriente en el LED (A).

$$R1 = \frac{(3,1 - 1,05)V}{2 \text{ mA}} = 1025 \Omega \Rightarrow R1 = 1200 \Omega$$

Por lo que se necesita una resistencia limitadora de 1200 Ω para que la corriente en el LED sea de 2 mA.

Por otra parte, para dimensionar la resistencia de polarización del MOSFET se calcula la corriente del colector en los terminales de salida del optoacoplador con la Ecuación (17) (Toshiba, 2018).

$$CTR = \frac{I_C}{I_f} \times 100\% \quad (17)$$

CTR : factor que indica la correspondencia entre corriente de salida de colector y la corriente de entrada al LED, I_C : corriente de colector (A), I_f : corriente en el LED (A).

$$I_C = 0,3 \times 2 \text{ mA} = 0,6 \text{ mA}$$

Para la obtención de la resistencia que polarizará al MOSFET se tiene la Ecuación (18) (Toshiba, 2018).

$$R2 = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{I_C} \quad (18)$$

$R2$: resistencia de polarización del MOSFET Ω , V_{CC} : voltaje de cada módulo fotovoltaico (V), $V_{CE(sat)}$: voltaje de saturación entre los terminales colector y emisor (V).

$$R2 = \frac{5 - 0,4}{0,6 \text{ mA}} = 7,6 \text{ K}\Omega \Rightarrow R2 = 8,2 \text{ k}\Omega$$

Por lo que se necesita una resistencia de 8,2 k Ω para la polarización del MOSFET.

Por último, los subsistemas diseñados se los integra dentro de una placa de cobre, constituyendo así el prototipo final o sensor autónomo, como lo muestra la Figura 4.

Además, se le coloca una carcasa de protección al prototipo con salida exterior para los conectores de medición de corriente y para la antena de comunicación inalámbrica, a fin de que la comunicación inalámbrica tenga un mayor alcance, como lo muestra en la Figura 5.

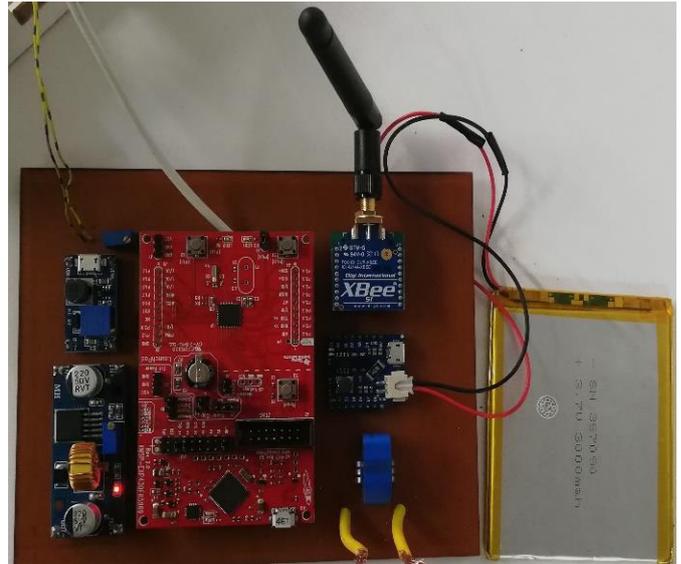


Figura 4. Vista superior de la placa base

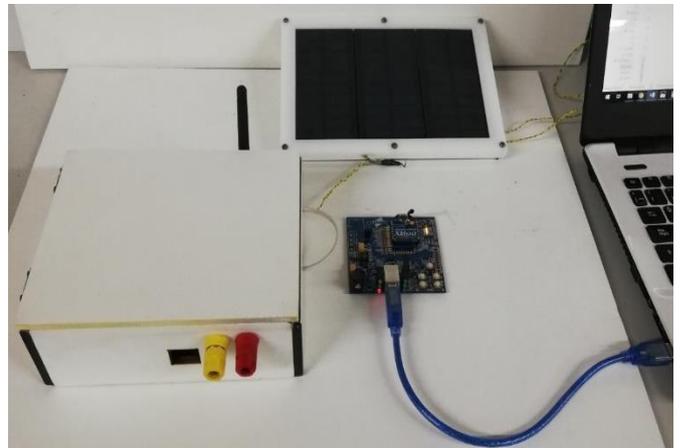


Figura 5. Implementación del sensor autónomo

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Se realizan pruebas de funcionamiento para comprobar que el sensor autónomo opere de manera adecuada y, a continuación, se detallan los resultados obtenidos.

3.1 Prueba de almacenamiento de energía

En un día seleccionado al azar se mide voltaje y corriente para verificar la generación de energía eléctrica de los módulos mientras alimentan al prototipo. Se implementó un circuito de adquisición de datos de ambas señales eléctricas con sus respectivos acondicionamientos de voltaje para que no dañen al microcontrolador. Esta prueba fue realizada durante 24 horas continuas para determinar las horas en las que se tiene una mayor generación energética y verificar si es la suficiente para cargar la batería implementada. La adquisición de los datos de las señales eléctricas se la realiza mediante un microcontrolador, el cual envía esta información al software LabVIEW mediante comunicación serial. Los datos adquiridos se almacenan en Excel para su posterior representación, como se observa en las Figuras 6 y 7.

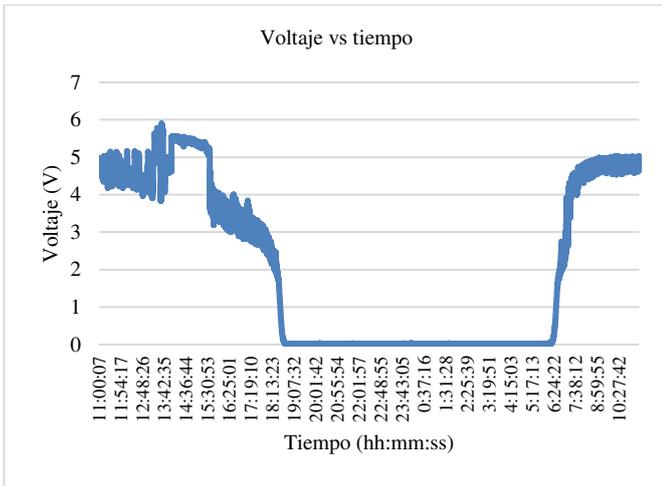


Figura 6. Gráfica voltaje vs tiempo de los módulos solares

Como lo muestra la Figura 6, el voltaje que se tiene entre las 8:00 am hasta las 04:00 pm es mayor al voltaje de carga de la batería, que es de 4 V, lo cual permite se realice la carga del acumulador de energía.

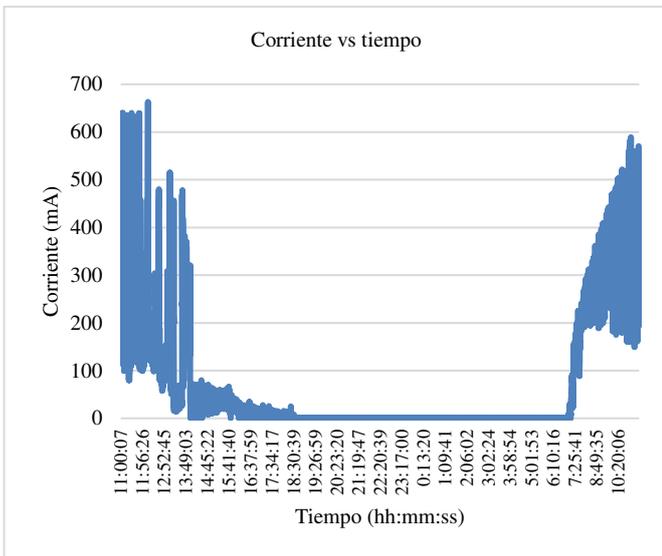


Figura 7. Gráfica corriente vs tiempo de los módulos solares

En la Figura 7, se puede observar que la corriente existente entre las 8:00 am hasta las 02:00 pm es mayor a 300 mA, por lo que se tiene el tiempo suficiente y un valor de corriente adecuado para cargar la batería en su totalidad en caso de que se encuentre descargada.

3.2 Prueba de consumo energético del sensor diseñado

Se comprueba el bajo consumo de energía del prototipo mediante una herramienta llamada Energy Trace que se encuentra dentro del programa Code Composer Studio, dicha herramienta analiza el código del microcontrolador por 30 segundos y muestra la potencia consumida por el microcontrolador considerando todos los elementos conectados a sus periféricos. Se realizan dos pruebas dentro de esta herramienta, la primera, es cuando el prototipo se encuentra transmitiendo información y, la segunda, cuando no transmite información y entra en un estado de bajo consumo

de potencia. Como resultado de dichas pruebas las Figuras 8 y Figura 9 muestran el consumo de potencia en función del tiempo para cada caso.

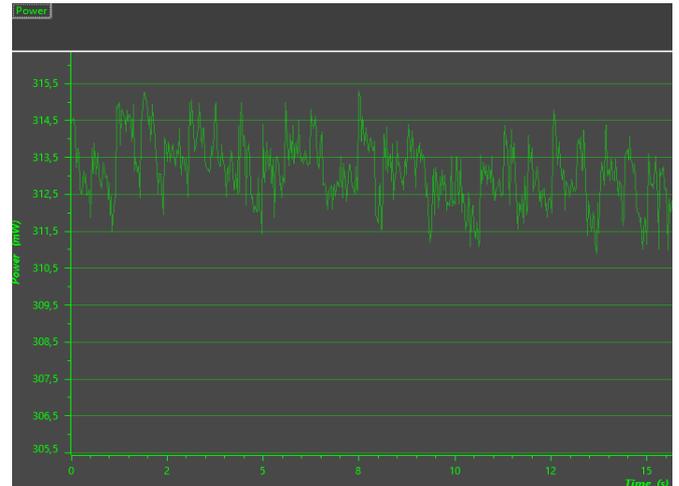


Figura 8. Consumo de potencia del prototipo; transmitiendo información

En la Figura 8, se puede observar el consumo de potencia que tiene el sensor autónomo cuando se encuentra transmitiendo información, este valor es de alrededor de 313 mW.

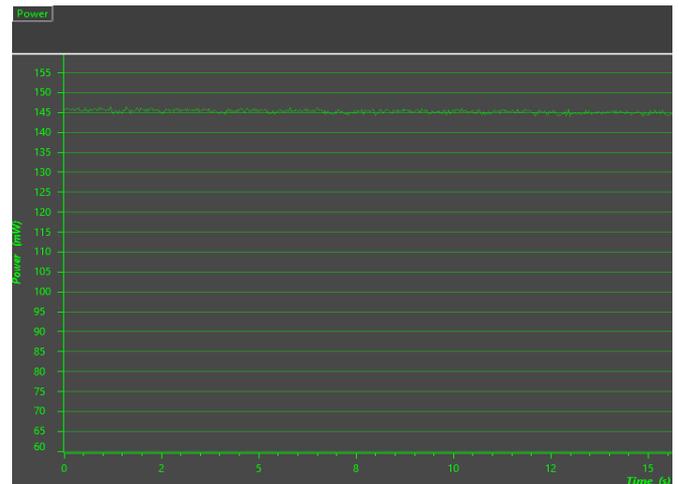


Figura 9. Consumo de potencia del prototipo; no transmitiendo información

El momento en que el prototipo no se encuentra transmitiendo información, el consumo de potencia disminuye hasta un valor constante de 145 mW como se muestra en la Figura 9.

Se ha comprobado que el sensor autónomo consume menor cantidad de energía cuando se encuentra en un estado de bajo consumo de potencia al no estar enviando constantemente información.

Otra funcionalidad de EnergyTrace es que dicha herramienta muestra el tiempo de autonomía que la batería puede brindar al prototipo y este valor fue de aproximadamente dos días, tal como se había propuesto en el diseño.

3.3 Prueba con motor de inducción

Una forma de comprobar el funcionamiento del prototipo, ante una perturbación, es realizar una prueba durante la operación de un motor de inducción trifásico, conectando el sensor autónomo a una de sus fases. La prueba consiste en encender el motor de inducción hasta llegar a su estado de operación normal, luego, indicar al sensor autónomo para que adquiera los valores de corriente y con ellos calcule un valor rms aproximado para que, finalmente, determine los valores picos de corriente y defina éstos como los límites entre el estado de transmisión y el de no transmisión de información. Las mediciones en operación normal pueden ser visualizadas mediante comunicación serial como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Mediciones de corriente en operación normal

Datos de corriente de operación normal medidos	
I_{rms}:	1.20 A
Valor pico superior:	1.76 A
Valor pico inferior:	-1.76 A

Para continuar con la prueba, se apaga y se vuelve a encender al motor, al tener una corriente de arranque con valor superior a la corriente en operación normal, el prototipo comienza a transmitir los datos de corriente hasta finalizar el estado transitorio y llegar a su operación normal.

En la Figura 10, se observan los resultados transmitidos por el prototipo durante el arranque del motor, los cuales fueron almacenados en LabVIEW y exportados a un archivo Excel para su representación.

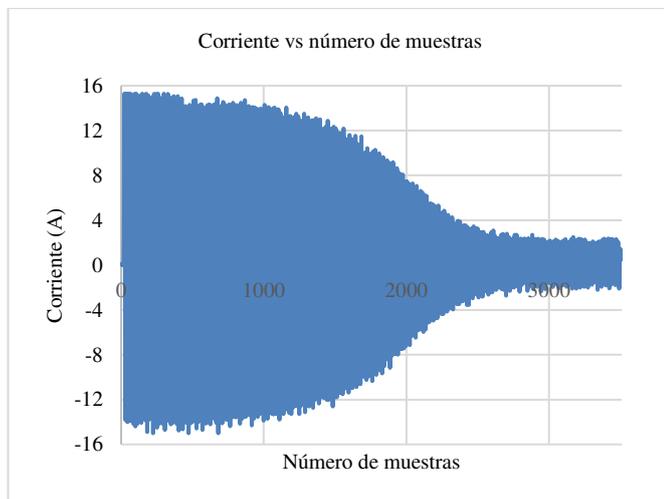


Figura 10. Corriente de arranque motor trifásico de inducción – Excel

Considerando que el arranque del motor tiene un transitorio con una duración aproximada de 3 segundos y considerando que se registran 20 muestras por ciclo, en una red de 60 ciclos por segundo, se tienen 3600 datos transmitidos por el prototipo durante el arranque del motor. Luego del arranque del motor la corriente vuelve a estar por debajo de los límites normales de operación y el sensor autónomo deja de transmitir información, entrando en modo de bajo consumo.

El motor utilizado tiene las especificaciones técnicas que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Datos de placa del motor de inducción utilizado

Bruxelles - CETEL					
Tipo	S611	Número	17	f	60 Hz
V	220-380V	Corriente	7 - 4 A	T.min	1800
CV	2	Fases	3	cos φ	-

3.4 Prueba del sensor prototipo aplicada a un transformador

Se realiza la prueba de cortocircuito en un transformador monofásico. Inicialmente se le conecta alimentación de 120 V y carga de 33Ω con factor de potencia unitario en cada bobinado y, mediante un conmutador, se produce un cortocircuito al devanado secundario del transformador monofásico que, a su vez, induce elevadas corrientes en el bobinado primario, lugar de conexión del sensor autónomo. Para la protección de las bobinas se utilizó un fusible de 5A. Esta prueba comprueba el correcto funcionamiento del prototipo ante perturbaciones con una elevada corriente y un transitorio de corta duración debido a que los fusibles actúan en el momento que su filamento se funde. Los datos fueron almacenados y graficados en un archivo Excel, como se muestra en la Figura 11.

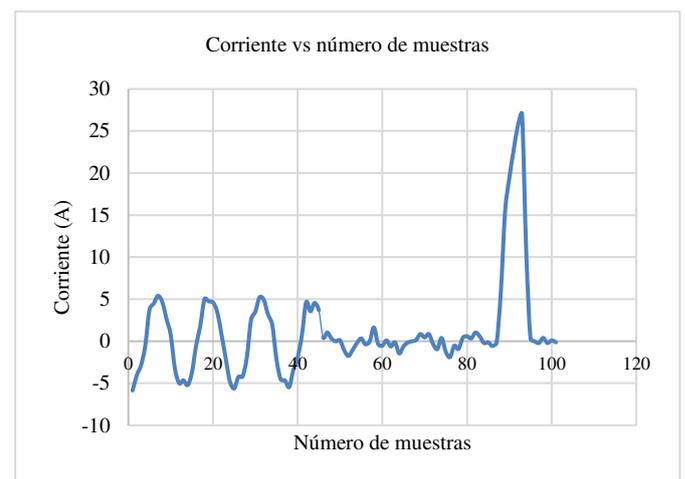


Figura 11. Corriente de cortocircuito en transformador – Excel

Los resultados obtenidos comprueban el funcionamiento del sensor autónomo, ya que, al detectar una señal de corriente mayor a los límites establecidos para la transmisión, el prototipo transmite la información y como se observa en la Figura 11, la corriente llega a valores de 28 A pico, donde el fusible se funde y la corriente se hace cero.

3.5 Prueba de alcance de comunicación

En esta prueba se transmite 100 conglomerados de datos enviados desde el emisor hacia el receptor, a distintas distancias de separación, para determinar la máxima distancia a la cual los módulos se intercomunican; para este caso, se mide y analiza el indicador de la fuerza con que llega la señal y, para asegurar una buena calidad en la señal, este valor puede llegar hasta -70 dBm (Núñez y col. 2017). Para la prueba los módulos XBee tienen una directa línea de visión y la prueba se realiza en exteriores e interiores.

El programa XCTU realiza pruebas de rango en medio de los módulos de comunicación y al final permite obtener como resultado la potencia de la señal y el porcentaje exitoso en el envío y recepción a determinadas distancias, estos valores se indican en la Tabla 9.

Tabla 9. Pruebas de rango de comunicación inalámbrica

Pruebas realizadas en exteriores				
Distancia entre módulos [m]	Datos enviados	Datos recibidos	Tasa de envío y recepción [%]	Potencia en la señal [dBm]
10	100	100	100	-57
20	100	100	100	-60
30	100	100	100	-62
40	100	97	97	-66
50	100	96	96	-68
60	100	92	92	-70
70	100	58	58	-75
Pruebas realizadas en interiores				
10	100	100	100	-50
20	100	100	100	-57
30	100	99	99	-59
40	100	99	99	-63
50	100	66	66	-75

Como resultados de la prueba de comunicación, sin conexión alámbrica, se tiene que en campo abierto existen un alcance de 60 m con una buena calidad en la señal y una tasa de carga y descarga exitosa superior al 92%, por otra parte, en instalaciones interiores donde existen elementos que obstaculizan la comunicación, la distancia de alcance disminuyó a 40 m.

4. CONCLUSIONES

De los distintos recursos energéticos medio ambientales, se definió el uso de energía solar como fuente de energía para el sensor inalámbrico autónomo debido a que esta tecnología se encuentra más desarrollada, tiene un bajo costo de implementación y en el mercado se dispone de gran variedad de los elementos que la constituyen en comparación con otros tipos de energía.

En la operación del prototipo se logró un muy bajo consumo de energía, igual a 4,67 Wh/día, mediante dos dispositivos fundamentales que son: la tarjeta MSP430-FR5969 y los módulos de comunicación XBee S1, priorizando que estos últimos elementos trabajen en modo de bajo consumo cuando no sea necesaria la transmisión de información.

En el prototipo se logró implementar un algoritmo de procesamiento de datos que permite determinar si los valores de corriente del sistema de prueba se mantienen o salen del rango normal de operación y que a su vez ayuda al ultra bajo consumo de energía del prototipo. Además, con el fin de lograr la detección de perturbaciones muy rápidas en la señal medida, se estableció un tiempo de muestreo, de 20 muestras por ciclo, que asegura la obtención de una gran cantidad de datos para cada posible evento atípico presente en un sistema eléctrico, tal como los muestran los resultados de las pruebas realizadas en este artículo.

Se determinó las distancias máximas para la comunicación entre los módulos XBee S1, obteniéndose distancias mayores para cuando se trabaja en exteriores, lo que permite que el sensor autónomo, que contiene al emisor, pueda colocarse hasta a 60 m con línea de visión directa al receptor, ahorrando un costo económico en la implementación del cableado para la transmisión de las señales. Al trabajar en interiores, el alcance de comunicación se redujo a 40 m debido a paredes y objetos que disminuyen la potencia de la señal.

AGRADECIMIENTO

El presente artículo se desarrolló gracias al apoyo del Dr. Sorin Melinte de la Université Catholique de Louvain (UCL) - Bélgica.

REFERENCIAS

- Abella, M. A. (2012). *Sistemas Fotovoltaicos*. Madrid, España: Centro de Investigaciones, Medioambientales y Tecnológicas, 3-6.
- AEROSEMI. (2015). MT3608. Pekin, China: AEROSEMI, 1-5.
- Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2019). Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución codificado. Quito, Ecuador: ARCONEL, 20.
- Alonso Lorenzo, J. A. (2016). SUNFIELDS EUROPE (Manual para el cálculo de paneles fotovoltaicos). Obtenido de: <https://www.sfe-solar.com/baterias-solares/manual-calculo/>. (Mayo, 2019).
- Caina Aysabucha, Darwin R. et al. (2019). Flexible SiNWs-based thermoelectric generators for healthcare monitoring, Conference E-MRS 2019 Spring Meeting, Nice-France.
- Catalán López, J. (2013). Energy Harvesting: Estado del arte y diseño de un sensor de temperatura inalámbrico alimentado por energía fotoeléctrica con sistema de alimentación de apoyo por radiofrecuencia, Trabajo de Maestría, Zaragoza: Universidad de Zaragoza, 10-50.
- CIRCE. (2015). Energía Fotovoltaica conectada a la red. Capacitación para análisis y regulatorio de la inmersión de generación no convencional en el SIN del Ecuador. Zaragoza.
- DIGI. (2018). XBee/XBee-PRO S1 802.15.4 (Legacy) RF MODULES. Obtenido de: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000982.pdf>. (Febrero, 2019).
- IXYS. (2018). IXOLAR High Efficiency SolarMD. Obtenido de: http://ixapps.ixys.com/DataSheet/SLMD600H10L_Nov16.pdf. (Mayo, 2019).
- J&A. (2012). Lithium-ion Polymer Battery Specification. Obtenido de: <https://www.olimex.com/Products/Power/BATTERY-LIPO250mAh/resources/JA602025P-Spec-Data-Sheet-3.7V-250mAh--170116.pdf>. (Enero, 2019).
- LEM. (2017). Current Transducer LTS 15-NP. Obtenido de: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lts_15-np.pdf. (Enero, 2019).
- Mijarez, R. (2014). *Electrónica*. Ciudad de México, México: Patria, 120-126.
- Núñez Pérez, J. C., Bonilla Rodríguez, A., & Calvillo Téllez, A. (2017). Estimación del alcance de radiotransmisores Xbee. Trabajo de Titulación, Baja California: Instituto Politécnico Nacional, 15-19.
- Ochoa Méndez, A. E. (2013). Estudio para determinar las pérdidas de energía del alimentador 124 pertenecientes al sistema de distribución de la empresa eléctrica Azogues. Trabajo de Titulación, Cuenca: Universidad Politécnica Nacional, 15-21.
- Ramirez Castaño, J. S. (2014). *Protección de Sistemas Eléctricos*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 65,66.
- Rustom J., A. (2012). *Estadística descriptiva, probabilidad e inferencia*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile, 30-35.
- Texas Instruments. (2015). MSP430FR5969 LaunchPad Development Kit. Obtenido de: <http://www.ti.com/tool/MSP-EXP430FR5969>. (Febrero, 2019).
- Texas Instruments. (2017). MSP430FR59XX User's Guide. Obtenido de: <http://www.ti.com/lit/ug/slau367o/slau367o.pdf>. (Febrero, 2019).
- Toshiba. (2018). Basic characteristics and application circuit design of IC couplers, Tokio, Japón: Toshiba, 8-13.

- Velasco, A., Soler, J., & Botina, O. (2016). Divisores de tensión y corriente. Trabajo de Titulación, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 3-10.
- VISHAY. (2003). 1N4728A to 1N4764A. Obtenido de: <https://www.vishay.com/docs/85816/1n4728a.pdf>. (Febrero, 2019).
- VISHAY. (2017). BAT42, BAT43 Small Signal Schottky Diode. Obtenido de: <https://www.vishay.com/docs/85660/bat42.pdf>. (Mayo, 2019).
- XLSEMI. (2017). XL4015 Buck DC to DC Converter. Obtenido de: <http://www.xlsemi.com/datasheet/XL4015%20datasheet.pdf>. (Mayo, 2019).

BIOGRAFÍAS



Andrés Marcelo Barahona Correa. Nació en Quito, Ecuador en 1995. Recibió el título de Ingeniero en Electrónica y Control de la Escuela Politécnica Nacional en 2019. Actualmente se desempeña como encargado de laboratorio en la empresa Optimovilidad S.A.



Jaime Oswaldo Salazar Cajamarca. Nació en Quito, Ecuador en 1995. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2019. Actualmente se desempeña como Supervisor Eléctrico en el proyecto “Rehabilitación integral emergente del sistema de bombeo del sistema Papallacta Integrado, en las estaciones Elevadora, Booster I y Booster II del sistema Papallacta Integrado”.



Mauricio Santiago Soria Colina. Nació en Ambato, Ecuador en 1991. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2016. En 2020, obtuvo el título de Magíster en Electricidad mención Redes Eléctricas Inteligentes en la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente se desempeña como Técnico Docente en la institución donde cursó sus estudios superiores. Su campo de investigación está relacionado con el desarrollo de Sistemas Eléctricos Inteligentes.



Edison Gabriel Novoa Guamán. Nació en Quito, Ecuador en 1992. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2015. En 2021, obtuvo el título de Magíster en Ingeniería Eléctrica en Distribución en la Escuela Politécnica Nacional. Trabajó como técnico eléctrico en Help Energy Consultores S.A., la Empresa Eléctrica Quito y actualmente se desempeña como Técnico Docente en la institución donde cursó sus estudios superiores. Su campo de

interés es el estudio de los Sistemas Eléctricos de Distribución de Energía Eléctrica.



Darwin Rodolfo Caina Aysabucha. Nació en Ambato (Ecuador). Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional. Máster de Ciencias en Tecnologías de la Información de la Hochschule Mannheim (Alemania). Cursa estudios de Doctorado en la Université catholique de Louvain con el apoyo de ARES (Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur) de Bélgica. Profesor titular en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central del Ecuador. Sus ramas de interés e investigación Nanoelectrónica, Microelectrónica, Antenas, Internet de las cosas (IoT) para aplicaciones de salud y agricultura.



Fabián Ernesto Pérez Yauli, nació en Ambato- Ecuador. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador en 2004. En 2012 obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan, San Juan-Argentina, con una beca otorgada por el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD). Actualmente es profesor titular a tiempo completo en la Escuela Politécnica Nacional. Su rama de investigación incluye protecciones de sistemas de potencia y procesamiento de señales.

Análisis de la Correlación entre las Emisiones Gaseosas y el Desempeño Energético de Fuentes Fijas de Combustión en Ecuador

Cabrera, Marcelo¹ * ; Montenegro, Lucía² ; Guanulema, Jorge³ 

¹Universidad Internacional del Ecuador, Escuela de Gestión Ambiental, Quito, Ecuador

²Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

³Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Quito, Ecuador

Resumen: En esta investigación, se analizó la eficiencia de combustión de veinte hornos a gas y fuel oil de refinerías alrededor del Ecuador, y treinta calderos de diferentes industrias en la ciudad de Quito, así como las emisiones de gases generadas y la rentabilidad de la inserción de precalentadores de aire para mejorar los procesos de combustión. El estudio se realizó en un periodo de 6 meses, obteniéndose los factores de emisión en los hornos a gas de 4,5 kg de SO₂/kg de gas quemado; 22,4 de NO_x/kg de gas quemado y 44,5 kg de CO/ kg de gas quemado; mientras que los factores de emisión hallados para los hornos a fuel oil fueron de 93,9 kg de SO₂/kg de fuel oil; 24,9 kg de NO_x/kg de fuel oil y 2,5 kg de CO/kg de fuel oil. Por otra parte, los factores típicos de emisión de los calderos fueron de 1,7 kg de SO₂ /kg de diésel quemado; 1,5 kg de NO_x/kg de diésel quemado y 1,0 kg de CO/kg de diésel quemado. Finalmente, la implementación de un precalentador de aire aumenta la eficiencia del caldero analizado (CD20) en un 4,1%, lo cual implicó un valor actual neto (VAN) de USD 8 325,77 y un TIR del 31 %, con lo cual se determinó la factibilidad y rentabilidad del proyecto.

Palabras clave: Calderos, Eficiencia, Factores de emisión, Hornos, Intercambiador de calor, Precalentador de Aire.

Analysis of the Correlation Between Gaseous Emissions and Energy Performance of Fixed Combustion Sources in Ecuador

Abstract: In this research, the combustion efficiency of twenty gas and fuel oil furnaces from refineries around Ecuador, and thirty boilers from different industries in the city of Quito were analyzed, as well as the gas emissions generated and the profitability of the insertion of air pre-heaters to improve the combustion processes. The study was conducted over a period of 6 months, obtaining the emission factors for the gas-fired furnaces of 4.5 kg of SO₂/kg of gas burned; 22.4 of NO_x/kg of gas burned and 44.5 kg of CO/kg of gas burned; while the emission factors found for the fuel oil furnaces were 93.9 kg of SO₂/kg of fuel oil; 24.9 kg of NO_x/kg of fuel oil and 2.5 kg of CO/kg of fuel oil. On the other hand, typical emission factors for the boilers were 1.7 kg SO₂/kg of diesel burned; 1.5 kg NO_x/kg of diesel burned and 1.0 kg CO/kg of diesel burned. Finally, the implementation of the air preheater increases the efficiency of the CD20 boiler by 4.1%, which implied a net present value (NPV) of USD 8 325,77 and an IRR of 31%, which determined the feasibility and profitability of the project.

Keywords: Boilers, Efficiency, Emission factors, Furnaces, Heat exchangers, Air preheater.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de la atmósfera es el resultado de la alteración en la composición natural del aire. Estos contaminantes representan un gran riesgo para la salud pública. Las Directrices de la OMS establecen los contaminantes PM (partículas), ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂) como contaminantes de interés global. Uno de los indicadores que

produce mayor preocupación es el PM_{2.5}, cantidad de partículas en suspensión menores a 2,5 micras, que mide el nivel de contaminación urbana. Estos contaminantes afectan al ambiente y a las condiciones de vida de los seres vivos. Otros autores establecen contaminantes adicionales a los declarados por la OMS, como son: monóxido y dióxido de carbono (CO), (CO₂); y óxidos de nitrógeno (NO_x) (Wark y Cecil, 2008, p. 22; OMS, 2018, p.1).

*macabrera@uide.edu.ec
Recibido: 23/10/2020
Aceptado: 06/07/2021
Publicado: 31/08/2021
10.33333/rp.vol48n1.04
CC 4.0

Para poder calcular las emisiones de contaminantes y como una estimación en la construcción de inventarios de emisiones, se emplea una herramienta de gestión ambiental llamada factor de emisión, que sirve para identificar la procedencia de los contaminantes que degradan la calidad del aire en una zona definida, en un período determinado. Este valor representa la relación entre la cantidad de contaminantes emitidos al ambiente con una variable de actividad asociada, por ejemplo, el uso de combustible, o los kilovatios consumidos o giga Joules de energía generados. Hay dos tipos de factores de emisión, el primero se basa en los procesos que generan emisiones y utiliza los datos de muestreos realizados a diversas fuentes para su cálculo, y el segundo se basa en censos socioeconómicos. Los factores de emisión con base en procesos se utilizan para la determinación de emisiones en fuentes fijas, y normalmente se relacionan con otros datos como balances de masa o encuestas. Por otro lado, aquellos con base en censos se emplean para valoraciones de las fuentes fijas de área (EPA, 2014).

El desempeño energético está definido por ISO 50001 (2018) como una medida o cuantificación de la relación entre el uso de la energía, la eficiencia energética y el consumo de la misma.

Conforme a lo mencionado, esta investigación tiene como objetivo el proporcionar datos de emisión reales de calderos y hornos a nivel local, de modo que sean útiles en la aplicación de inventarios de emisiones, el diseño de equipos de control, y la determinación de una línea base para el levantamiento de información en cada GAD. Cabe mencionar que en el Ecuador no existe una base de datos oficial con factores de emisión propios, y generalmente se emplean referencias internacionales como los contenidos en la AP-42 de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos (Torres y Urvina, 2008, p. 16).

En la industria capitalina, los equipos de combustión, considerados como fuentes fijas puntuales de emisión, que se encuentran con más frecuencia son los calderos y los hornos. Ambos equipos son responsables del mayor consumo de combustible, por lo cual es importante a nivel económico y ambiental el mejorar su eficiencia (CORPAIRE, 2014, pp. 9-11).

La energía térmica generada por los equipos de combustión y desechada al ambiente en forma de calor, es un área de oportunidad para la reutilización u optimización de recursos. La energía térmica emitida se puede emplear en procesos que involucren transferencia de calor, o bien, reducir las al emplear equipos con ventajas tecnológicas, ecológicas y económicas que disminuyan la pérdida de calor (Ayala, 2005, p. 10).

Para definir la eficiencia en un caldero se relaciona la cantidad de calor absorbido por el fluido (generalmente agua) para transformarse en vapor, y el calor generado por el combustible que se disipa por el equipo. Cuando se calcula la eficiencia energética de un caldero, es importante cuantificar el combustible que produce calor al reaccionar con el oxígeno de la cámara de combustión, así como considerar los gases producto de la combustión y el caudal del fluido que circula por el caldero que humedece los tubos por los cuales se

transportan los gases y humedece el exterior de la superficie de la cámara y que toma la energía resultante de la combustión para aumentar su temperatura (IDAE, 2017, p.21).

La eficiencia en un horno, por otra parte, se define como un valor expresado en porcentaje, de la cantidad de calor que se libera en la llama y es utilizado por el fluido o material de trabajo. Los valores de eficiencia generalmente oscilan entre el 70,0 % y el 95,0 %. Las ineficiencias ocurren cuando la energía en forma de calor se disipa a través de las paredes del equipo y cuando se generan gases como un producto de la combustión (Domingo, 2015, p. 6).

Esta investigación pretende aportar en dos ámbitos: el ambiental, al proporcionar datos reales de factores de emisión en hornos y calderos; y energético, al utilizar las curvas determinadas en este documento, para aumentar la eficiencia de los procesos y disminuir las emisiones (Torres y Urvina, 2008 p. 16).

2. MARCO METODOLÓGICO

Se seleccionaron 50 fuentes fijas de combustión, de ellas, 20 hornos de refinéras del Ecuador y 30 calderos del sector industrial de la ciudad de Quito. Para seleccionarlas, se tomó el criterio de continuidad de la operación de los equipos, así como la facilidad de realización de las mediciones.

La cuantificación de emisiones de los gases SO₂, O₂, CO₂, NO_x y CO fue realizada con un equipo para analizar gases de marca Testo 350 M/XL. Este analizador cuenta con sensores electroquímicos que permiten medir la concentración de los contaminantes mencionados, así también cuenta con una termocupla y un sensor que permiten medir la temperatura de la chimenea y la temperatura del ambiente (TESTO AG, 2007, p. 61).

El analizador fue debidamente calibrado y verificado por un laboratorio acreditado ante el Sistema de Acreditación Ecuatoriano (S.A.E.) para la realización de este tipo de mediciones. El rango para el cual se encuentra habilitado el equipo es: 10 a 2000 ppm para los parámetros de CO, SO₂ y NO_x.

Para calcular los factores de emisión, se realizó de manera general para cada contaminante “j” empleando la Ecuación 1 que se presenta a continuación:

$$Fe_j = \frac{1}{B} * \sum_{i=1}^n C_j * G_i * \rho_j * \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ mg}}\right) \quad (1)$$

Donde:

- Fe_j: factor de emisión del contaminante expresado en kg/kg de combustible
- C_j: concentración del gas contaminante medido (ml/m³)
- G_i: flujo de gases en el ducto o chimenea (m³/h)
- ρ_j: densidad del contaminante (mg/ml), a condiciones normales de temperatura y presión 20 °C y 760 mm Hg.
- B promedio del consumo de combustible (kg/h)

Una vez determinados los factores de emisión y las eficiencias promediadas, se construyeron las curvas para determinar las relaciones entre factor de emisión de contaminante, combustible empleado y eficiencia. Para el caso de los calderos, se realizó una distinción adicional que consistía en la discriminación debida a la potencia, de tal manera que fueron separados los equipos de la siguiente manera:

- Baja: Potencia del caldero menor a 100 brake horsepower (BHP)
- Media: Potencia del caldero entre 100 y 500 brake horsepower (BHP)
- Alta: Potencia del caldero mayor a 500 brake horsepower (BHP)

Como parte de esta investigación, se elaboró un estudio técnico-económico de una medida que permita mejorar la eficiencia de calderos, esta medida consistió en la planificación, diseño e implementación de precalentadores de aire que emplean termosifones bimetálicos aletados, los cuales pueden llegar a incrementar la eficiencia de combustión hasta en un 5 %, y consecuentemente una reducción considerable en el consumo de combustible (Ayala, 2005, p. 103).

A través de una aplicación desarrollada en una hoja de cálculo se determinaron las dimensiones del precalentador mientras que, con una evaluación de costos, se determinó el valor economizado en combustible por la mejora en la eficiencia del caldero. Para eso fue necesario además del costo del combustible, la información del número de horas por año de uso del caldero.

Durante el diseño y con el fin de evitar problemas en el sistema, se tomó en cuenta que la caída de presión de los gases de chimenea no se incremente y que la temperatura de los gases no sea menor que aquella del punto de rocío (Sánchez et al., 2011, p. 66).

Ayala (2005) sugiere considerar los criterios presentados a continuación, los cuales brindan un excelente marco para simplificar el cálculo de las dimensiones de los intercambiadores de termosifones aletados, y son:

- El promedio de cada termosifón define las condiciones de operación para el intercambiador.
- El diseño del banco de tubos presenta únicamente arreglo en forma de triángulo.
- 4 mm es la distancia mínima de montaje entre termosifones.
- Se espera que entre 7 m/s y 11 m/s sea la velocidad media en la zona de gases.
- 110 °C (383 K) debe ser la temperatura en la zona de salida de los gases de combustión para evitar el punto de rocío.
- La cantidad de termosifones de la primera y la última línea deberá ser igual.
- Para conservar una velocidad media entre las zonas, la relación entre las alturas de la zona de aire (x) y la zona del precalentador (y) deberá ser $x=0,4y$.

Tras un análisis de costos, se determinó que los componentes mínimos necesarios para el diseño de un intercambiador de calor son:

- banco de tubos de acero inoxidable
- base inferior y superior
- paredes laterales e intermedia
- un aislador
- acabado exterior,

Sobre lo expuesto, se cotizaron los elementos mínimos para obtener un presupuesto y sobre este se realizó el análisis económico descrito más adelante.

En la Tabla 1, se detallan los precios de los componentes necesarios para el ensamblaje de un precalentador de aire, entre ellos, se puede observar que los termosifones son el elemento de mayor inversión, puesto que son complejos y tienen una cantidad considerable de tubos.

Tabla 1. Principales componentes de un precalentador de aire

Unidad	Costo unitario (USD/elemento)
Termosifones (tubo interior, tubo aletado exterior)	208,26
Base baja	131,74
Base alta	276,26
Lámina media	115,61
Paredes laterales	68,44
Cubierta anterior	106,24
Cubierta posterior	106,24
Sellador	55,24

Se evaluó el ahorro económico en combustible que potencialmente se obtendría al implementar el sistema de recuperación de calor a través de los intercambiadores basados en termosifones bimetálicos aletados. Empleando una hoja de cálculo, se implementó una matriz para evaluar la utilidad, relacionando los egresos e ingresos tomando en cuenta variables como: depreciación, costos de operación, instalación y mantenimiento del sistema.

Adicionalmente, se determinó la viabilidad de la inversión a través de los parámetros económicos VAN y TIR.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en la información obtenida en el monitoreo de emisiones realizado a los hornos y calderos seleccionados, se determinaron las medias (μ) y desviaciones estándar (σ) de cada medida de emisión. A continuación, se representa en cada una de las gráficas la relación entre los factores de emisión y la eficiencia.

La relación entre la eficiencia y los factores de emisión de hornos fuel oil N° 4 se puede observar en la Figura 1, mientras que los resultados obtenidos de las emisiones en hornos a gas se presentan en la Figura 2.

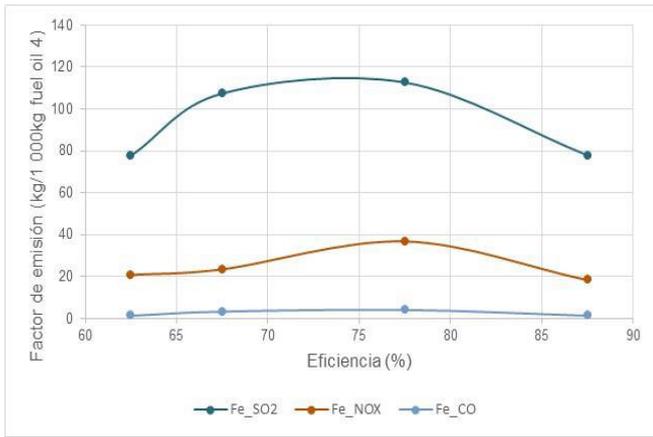


Figura 1. Relación entre el factor de emisión y la eficiencia (%) para hornos a fuel oil No. 4

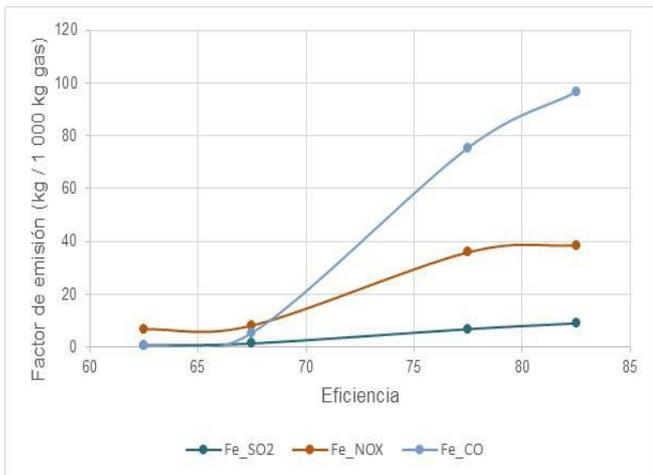


Figura 2. Relación entre el factor de emisión y la eficiencia (%) para hornos a gas

Los valores obtenidos en la medición de la eficiencia de hornos del presente estudio se mantuvieron en el rango entre 60 % y 90 %. El resultado mostrado en la Figura 1 responde a los hornos a fuel oil No. 4 donde se observa que la eficiencia alcanza un pico máximo entre el 75 % y 80 %, mientras que a los extremos (62,5 % y 87,5 %) los factores de emisión son mínimos para todos los gases.

En la Figura 2, se puede observar que a eficiencias superiores al 67 %, se incrementan considerablemente los factores de emisión, en especial del monóxido de carbono (CO). Los hornos a gas considerados en esta investigación trabajan a temperaturas por sobre los 300 °C o 573 °K. Se evidencia que, a mayores temperaturas, se genera una mayor eficacia del sistema, y por ende una menor cantidad de oxígeno presente lo que facilita la formación de gases contaminantes. Adicionalmente, el incremento de la presencia de SO₂ y NO_x se debe también a factores como el tiempo de permanencia de humos en la zona de combustión, el caudal de aire.

Las gráficas mostradas en la Figura 1 y en la Figura 2 permiten visualizar que las emisiones en un equipo varían entre los diferentes parámetros a analizar, presentando cada uno un comportamiento único, sin embargo, mantienen direcciones similares en crecientes a razón de los factores previamente mencionados.

Las Figuras 3, 4 y 5 corresponden a los factores de emisión de calderos que operan empleando diésel como combustible y de potencias media, baja y alta respectivamente.

La tendencia de los factores se mantiene en los calderos de potencia baja y media. Para el SO₂ a eficiencias a partir del 90% se presentó una disminución del factor de emisión, se atribuye este comportamiento al tiempo de mezcla aire-diésel que se da de mejor manera. En el caso del factor de emisión obtenido para los calderos de alta potencia prácticamente permanece constante alrededor de 1,5 kg/1000 kg de diésel en tanto para SO₂ como para NO_x, mientras que para el CO es cercano a 1 kg/1000 kg de diésel.

Una alta potencia significa un mayor consumo de combustible, una mayor presión de inyección, y una mezcla de aire a la salida distinta a lo generado en calderos de baja potencia, lo cual explica su comportamiento.

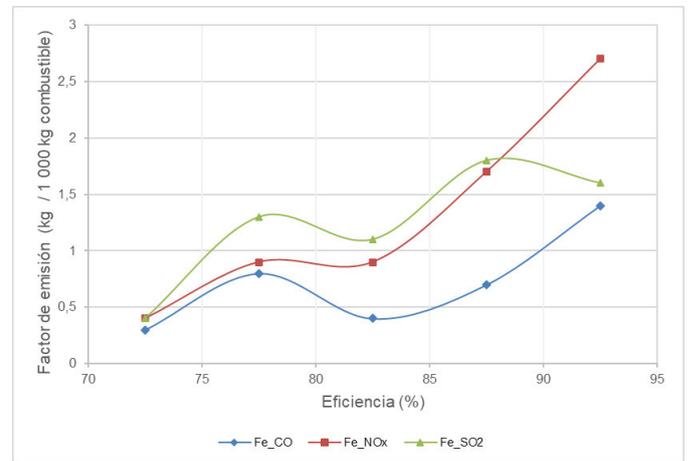


Figura 3. Relación entre los factores de emisión y la eficiencia de calderos a diésel de baja potencia

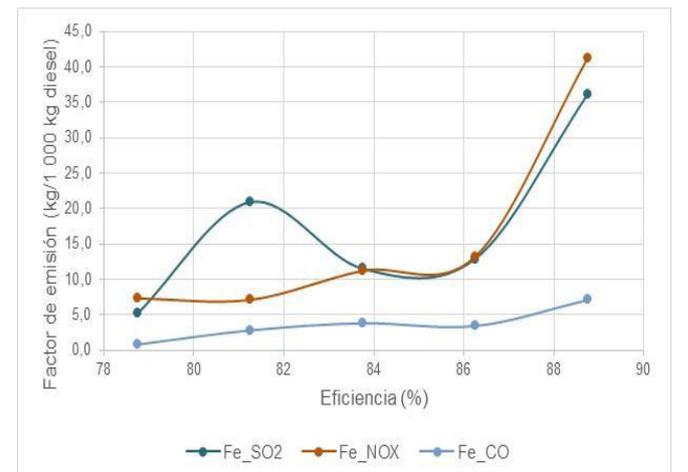


Figura 4. Relación entre los factores de emisión y la eficiencia de calderos de diésel de potencia media

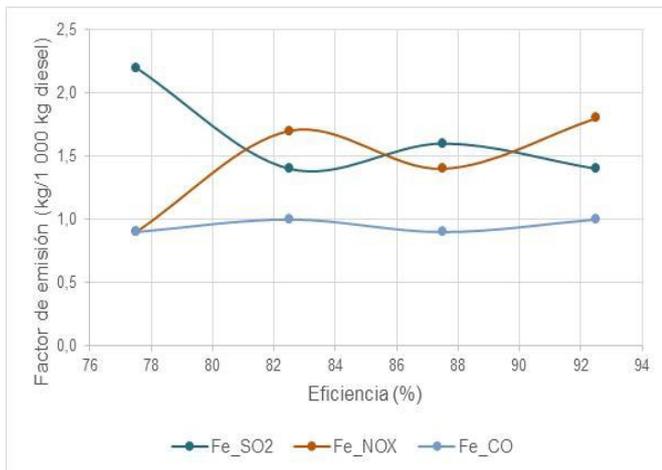


Figura 5. Relación entre los factores de emisión y la eficiencia para calderos de diésel de potencia alta

Las Figuras 6 y 7 corresponden a las relaciones entre factores de emisión y eficiencia obtenidos de la combustión del fuel oil No. 4 en calderos de baja y media potencia.

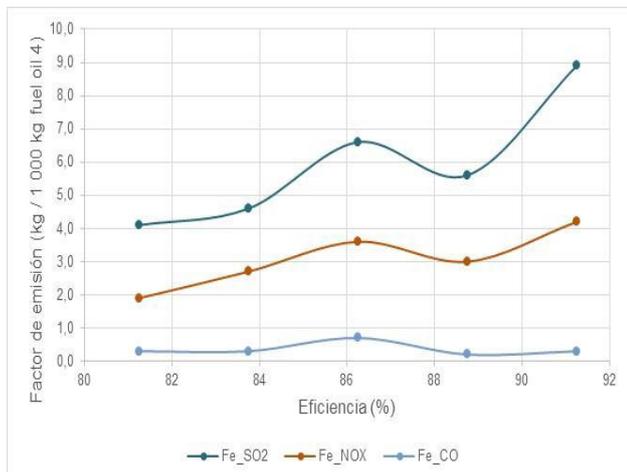


Figura 6. Relación entre factores de emisión y la eficiencia de calderos de fuel oil No.4 de baja potencia

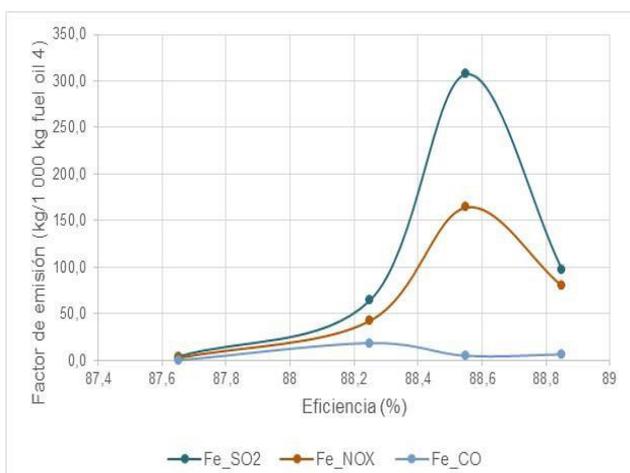


Figura 7. Relación entre los factores de emisión y la eficiencia de calderos fuel oil No.4 de potencia media

Los factores de emisión de CO se mantienen relativamente constantes en la Figura 6, mientras que los correspondientes al SO₂ y NO_x presentan comportamientos parabólicos con un

máximo al 86% para el rango de eficiencia entre 84% y 88% pero crecientes a eficiencias superiores al 88%.

Los resultados mostrados en la Figura 7 permiten apreciar que las curvas de SO₂, así como de NO_x mantienen tendencias muy semejantes. El CO en estos equipos presenta valores bajos, debido a esto su factor de emisión se comporta de igual forma, tal como se observa en la Figura 7.

En la Figura 8, se presentan los factores de emisión vs la eficiencia para calderos cuyo combustible es GLP y son de potencia media.

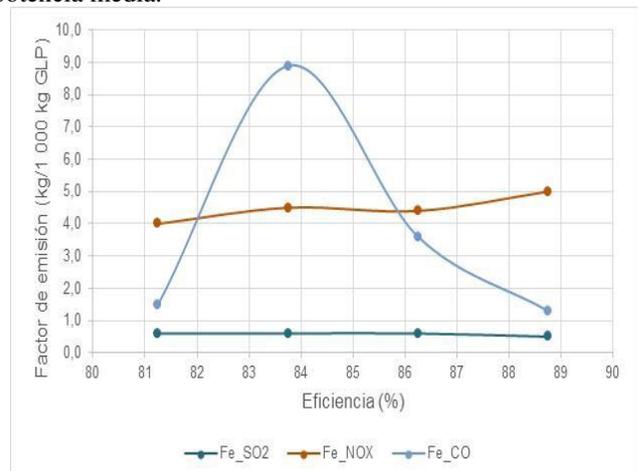


Figura 8. Relación entre los factores de emisión y la eficiencia para calderos GLP de potencia media

A diferencia de los gráficos anteriores, en el caso de los factores de emisión de calderos a gas licuado de petróleo (GLP) presentado en la Figura 8, cada curva presenta una tendencia diferente. En el caso del NO_x se mantiene alrededor de 4,5 kg/1 000 kg de gas, mientras que para el CO se mantiene constante en aproximadamente 0,8 kg/1 000 kg de Gas.

De manera general, se concluye que la gráfica de los factores de emisión vs la eficiencia no presenta un comportamiento que pueda generalizarse basado en regresiones matemáticas; sin embargo, el comportamiento entre contaminantes si puede ser asociado a una eficiencia. Para un caldero fuel oil de potencia baja, a una eficiencia 91 % determinada con el analizador de gases Testo 350 M/XL, las emisiones de SO₂ y NO_x estarán en su punto máximo y si estos valores propician el incumplimiento respecto a la norma, se puede sugerir operar a una eficiencia del 89% y reducir significativamente las emisiones. Evidentemente, esta sugerencia debe enmarcarse en las implicaciones técnico-económicas propias de la empresa.

Finalmente, en la Tabla 2 se presenta un resumen de los datos obtenidos durante el desarrollo de esta investigación comparados con los factores de emisión US EPA. De lo cual se puede concluir que el factor de emisión más confiable es el diésel para calderos de baja, media y alta potencia, mientras que el de menor confianza es el factor de emisión de SO₂ obtenido para hornos a gas.

Tabla 2. Valores obtenidos de factores de emisión vs Factores de emisión referenciales AP-42 US EPA

kg contaminante/ kg combustible		Factores de emisión calculados			Factores de emisión referenciales EPA		
		SO ₂	NO _x	CO	SO ₂	NO _x	CO
Hornos	Gas	4,5	22,4	44,5	0,3	2,3	1,9
	Fuel oil	93,9	24,9	2,5	23,6	6,8	0,6
Calderos Baja	Fuel oil	6,0	3,1	0,4	23,6	6,8	0,6
	Diesel	1,2	1,3	0,7	4,2	2,8	0,7
Calderos Media	Fuel oil	118,4	72,3	7,5	23,6	6,8	0,6
	Diesel	17,3	16,0	3,6	4,2	2,8	0,7
	GLP	0,6	4,5	3,8	0,3	4,4	7,6
Calderos Alta	Diesel	1,7	1,5	1,0	4,2	2,8	0,7

Como parte de este trabajo, se elaboró una propuesta para el diseño de un precalentador de caldero, de lo cual se pueden observar los parámetros en la Tabla 3 y el resultado del análisis económico con las variables TIR y VAN en la Tabla 4.

Tabla 3. Definición de los parámetros para el diseño del precalentador de aire para el caldero CD20

Parámetro	Cantidad	Unidad
Diámetro interno del tubo (acero)	0,020	m
Diámetro de contacto	0,025	m
Diámetro externo del tubo (aluminio)	0,028	m
Grosor de aleta	0,0005	m
Paso entre aletas	0,003	m
Diámetro externo de las aletas	0,055	m
Longitud de la zona de gases	0,9	m
Longitud de la zona de aire	0,6	m
Cantidad de termosifones en primera fila	5	-
Número de filas	7	-
Número total de termosifones	38	-

El desarrollo y diseño de intercambiadores de calor basados en termosifones bimetálicos aletados involucró la caracterización del gas de chimenea de los calderos CD12 y CD20, ambos de potencia media y operación a diésel, que son los equipos más comunes en el Distrito Metropolitano de Quito. A continuación, se realizó la determinación de las dimensiones y variables del precalentador, cálculos de la transferencia de calor debida a la convección en gases de escape, así como en el aire. Luego se realizaron cálculos de condensación y ebullición en el agua confinada en cada termosifón, seguido de la determinación de la temperatura media logarítmica (LMTD) y finalmente el calor transferido por el precalentador. Para evaluar la satisfacción con las dimensiones del precalentador obtenido se comparó el flujo calórico determinado en un principio mediante balance energético (16,3 kW) con el calor obtenido mediante las variables de diseño (18,1 kW). El criterio de aceptación fue 3 kW, con lo que se dio por viable el diseño de las dimensiones presentadas en la Tabla 3.

Tabla 4. Valor de los criterios financieros VAN y TIR para implementación del precalentador

Criterio Financiero	Cantidad
Valor Actual Neto (VAN)	\$ 8.325,77
Tasa interna de retorno (TIR)	31 %

En conclusión, el diseño de un intercambiador de calor que emplea termosifones aletados, cuya instalación, tentativa será realizada en el caldero CD20, es un proyecto económicamente factible de acuerdo con los indicadores económicos presentados en la Tabla 4, por lo cual se recomienda considerar esta alternativa para la mejora en la eficiencia de equipos de combustión fija que aplique.

4. CONCLUSIONES

Los hornos estudiados que operan a gas en el país cumplen con las concentraciones establecidas en la normativa aplicable vigente y sus valores promedios fueron respectivamente de 21 mg/m³ vs 30 mg/m³, 110 mg/m³ vs 400 mg/m³ y 173 mg/m³ vs N/A para los gases SO₂, NO_x y CO, con una eficiencia del 70,80 %.

Las emisiones gaseosas producidas por los trece hornos de refinería a fuel oil fueron respectivamente: 0,964 g/m³, 0,283 g/m³ y 0,034 g/m³ para SO₂, NO_x y CO con una eficiencia del 74,3 %, valores que cumplen con la exigencia de la entidad de control del país.

En los calderos a diésel, las emisiones de los calderos de los gases contaminantes SO₂ y NO_x incrementan proporcionalmente a la potencia del equipo; no obstante, no superan los límites establecidos por la normativa ambiental aplicable.

Cerca del 95,0 % de los calderos analizados en este estudio, cumplen con la Resolución 002 vigente en el Distrito Metropolitano de Quito (agosto 2004) que trata de las emisiones gaseosas a la atmósfera.

Las siguientes eficiencias 62,5 %, 65 %, y 62,5 % de los gases SO₂, NO_x y CO, para los factores de emisión de hornos a gas de refinería son las que más se aproximan a los valores establecidos por la EPA. Esta diferencia evidencia la necesidad de determinar factores de emisión propios para nuestro país.

No está determinada una eficiencia para la cual los factores de emisión de los hornos a fuel oil, hallados en esta investigación, se acerquen a los señalados por la EPA. Esto se asocia a la concentración de azufre en el combustible y a las condiciones operativas de los equipos, pues se evidenció que al menos un 60% de los calderos se encuentran sobredimensionados por lo cual operan hasta 1 hora por día.

El factor de emisión de la EPA del monóxido de carbono (CO), y el determinado para los calderos a fuel oil de baja potencia se da a una eficiencia del 85,5 %, mientras que para el SO₂ y el NO_x no existen valores de eficiencia que se aproximen al valor referencial correspondiente.

En calderos a diésel de baja potencia, la eficiencia al 92,5 % del factor de emisión de NO_x es el porcentaje más aproximado a los valores establecidos por la EPA, mientras que para el factor de emisión del monóxido de carbono (CO) existen tres posibles porcentajes de aproximación hacia los factores de emisión EPA que son del 76 %, 80 % y 87,5 %.

Las relaciones obtenidas entre el combustible, potencia o tipo de fuente fija, se puede predecir un intervalo de eficiencia en el cual las emisiones de cada tipo de fuente de combustión tiendan a minimizarse.

La implementación de un precalentador de aire para el caldero CD20 es un proyecto viable, con un VAN fue de 8 325,77 USD y un TIR del 31 %.

REFERENCIAS

- Ayala, E. (2005). *Desarrollo de precalentadores de aire compactos para recuperar energía de los gases de escape en calderos industriales de baja potencia*. (Proyecto de titulación previa a la obtención del título de maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica). Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México.
- CORPAIRE (2014). *Informe final. Inventario de emisiones contaminantes*. Recuperado de: http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/phocadownload/cambio_climatico/infor_final_ie_criterio_dm2011_1.pdf (abril 2021).
- Domingo, T. (2015). *Diseño de equipos de instalación: Hornos y Calderos*. Recuperado de http://web.usal.es/~tonidm/DEL_08_comp.pdf (noviembre, 2019).
- EPA (2014). *Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide, and Oxygen Emissions from Natural Gas-Fired Engines, Boilers and Process Heaters Using Portable Analyzers (CTM-030)*. Recuperado de <http://www.EPA.gov/ttnemc01/ctm/ctm-030.pdf> (octubre, 2019).
- IDAE. (2017). *Procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderos*. Recuperado de http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10540_Procedimientos_inspeccion_calderos_GT_5_07_f5b208e3.pdf (octubre, 2019)
- ISO 50001 (2018). *Sistemas de Gestión de la energía*. Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50001:ed-2:v1:en> (octubre, 2020).
- Wark, K. y Cecil, W. (2008). *Contaminación del aire. Origen y Control*. México: Limusa.
- OMS. (2018). *Calidad del aire y salud*. Recuperado de: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (abril, 2021).
- Sánchez, F. et al. (2011). Diseño térmico y mecánico de un intercambiador de calor en base a tubos termosifones bifásicos. *GetInfo*, 12(3), 63-70. doi: 10.1006/jezp.0716.8756.
- TESTO AG. (2007). *Análisis de gases de combustión en la industria: Guía práctica para medir emisiones y procesos*. Recuperado de http://www.Testo.com/online/embedded/Sites/ARG/SharedDocuments/Downloads/Guia_emisiones.pdf (octubre, 2019).
- Torres, J., y Urvina V. (2008). *Determinación de los factores reales de emisión de los motores ciclo Otto en la ciudad de Quito*. (Proyecto de titulación previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

BIOGRAFÍAS



Marcelo F. Cabrera J. Nacido el 05 de marzo de 1986 en Quito-Ecuador, estudios completos de pregrado en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero Químico Aprobado Cum Laude. Título de posgrado en la Universidad Internacional SEK como Magíster en Gestión Ambiental. Ha trabajado en Incinerox, Chemeng, Unidad Educativa Jean Jacques Rousseau, Escuela Politécnica Nacional y Universidad Internacional del Ecuador donde hasta la actualidad labora como docente en la Escuela de Gestión Ambiental en la UIDE y Coordinador del Laboratorio de Análisis Instrumental de la EPN. Ha realizado 5 publicaciones en revistas LatinIndex y 6 conferencias sobre contaminación ambiental y cursos de perfeccionamiento docente. macabrera@uide.edu.ec / marcelofabian_cabrera@yaho.com



Lucía Margarita Montenegro Aguas. Ingeniera Química, Magister en Ingeniería Ambiental ha sido docente por 24 años en la EPN de las cátedras de Transferencia de Calor, Control de la Contaminación del Aire entre otras. Cuenta con la Certificación de Evaluador de la Norma ISO 17025 para laboratorios. En referencia a las publicaciones las ha realizado en la “Revista Politécnica” y en la “1st International Conference on Water and Sustainability” con temas relacionados al Tratamiento de aguas y Remediación de Suelos. Ha dictado más de 20 seminarios y conferencias de Monitoreo Ambiental; y dirigido más de 40 proyectos de titulación en temas de Transferencia de Calor, Refinación del Petróleo y Contaminación Ambiental. lucia.montenegro@epn.edu.ec



Jorge Guanulema. Ingeniero Químico graduado en la Escuela Politécnica Nacional Diplomado en Gerencia de Sistemas Integrados de Gestión HSEQ Universidad de Catalunya. Auditor Interno Sistemas integrados de Gestión HSEQ por SGS. Auditor interno ISO 9001:2015 por SGS. Analista Ambiental Senior en Grupo Consultor

Chemeng (8 años). Técnico Ambiental en Secretaría de Ambiente del GAD del DMQ (actualmente). Experto Técnico ISO IEC 17025:2018 en el Servicio de Acreditación Ecuatoriano SAE para emisiones desde fuentes fijas de combustión, ruido ambiental laboral y Muestreo (actualmente) Evaluador de conformidad en Entrenamiento ISO IEC 17025:2018 Servicio de Acreditación Ecuatoriano SAE (actualmente)

Análisis de Inundación por Rotura de Presa Utilizando el Modelo HEC-RAS 2D: Caso de Estudio de la Presa Mulacorrall, Provincia de Tungurahua, Ecuador

Toapaxi-Alvarez, Jorge^{1,*} ; Acero-Quilumbaquin, Andrés¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

Resumen: Este estudio tiene como objetivo analizar la inundación causada por la falla hipotética de la Presa Mulacorrall, cuyo embalse está localizado en la cuenca alta del río Ambato en la cota 3831 msnm. La presa está ubicada a 42 kilómetros en dirección noroeste de la ciudad de Ambato, capital de la Provincia de Tungurahua, Ecuador. Para el análisis, se consideró una longitud de cauce de 50 kilómetros aproximadamente, desde el pie de la presa hasta los límites de la ciudad de Ambato, en el sector de la planta de tratamiento de aguas residuales. Se ejecutó 10 planes de simulación considerando: el modo de la falla de la presa (tubificación y desborde), opciones de cómputo y tolerancias del programa. Los resultados fueron verificados con ecuaciones de regresión, desarrolladas con base en antecedentes históricos. Los escenarios de rotura presentan en todos los casos niveles de agua que alcanzan la estructura de la vía Flores e infraestructura que se encuentra en las riberas del río Ambato, en un margen promedio de 100 metros. De los escenarios de rotura planteados, se destaca el modelo que utiliza la Ecuación de Froehlich (2008) para falla por desborde, ya que presenta resultados conservadores, un caudal pico máximo de 1271 m³/s y un tiempo de llegada de 2 horas con 20 minutos a la ciudad de Ambato.

Palabras clave: HEC-RAS, Mulacorrall, simulación, bidimensional, presa, rotura.

Dam-Break Flooding Analysis Using HEC-RAS 2D Model: Case Study of the Mulacorrall Dam, Tungurahua Province, Ecuador

Abstract: This study aims to analyze the flood caused by the hypothetical failure of the Mulacorrall Dam, whose reservoir is located in the upper basin of the Ambato River at 3831 meters above sea level. The dam is located 42 kilometers northwest of Ambato city, capital of the Tungurahua Province, Ecuador. For the analysis, a length of approximately 50 kilometers was considered, from the dam foot to the limits of the Ambato city, in the wastewater treatment plant sector. Ten simulation plans were executed considering: the dam failure mode (piping and overflow), computation options and program tolerances. The results were verified with regression equations, developed based on historical background. In all cases, the failure scenarios present water levels that reach the Flores Avenue structure and infrastructure located on the banks of the Ambato River, in an average margin of 100 meters. Of the breakage scenarios proposed, the model used by the Froehlich Equation (2008) for overflow failure stands out, since it presents conservative results, a maximum peak flow of 1271 m³/s and a time of arrival of 2 hours and 20 minutes to the Ambato city.

Keywords: HEC-RAS, Mulacorrall, simulation, two-dimensional, dam, breakage.

1. INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento poblacional y el incremento de las actividades económicas, aumentan la demanda de agua para: uso doméstico, agricultura, el sector industrial, la generación de energía eléctrica, recreación, entre otros. En este contexto, la construcción de presas para almacenamiento de agua permiten satisfacer dichas necesidades, constituyendo elementos indispensables para muchos países en vías de desarrollo (Altinbilek, 2002). De

hecho, las presas han hecho aportes significativos para el crecimiento económico y social; así como también, han desempeñado un rol fundamental en la gestión del recurso hídrico, con miras a alcanzar la soberanía alimentaria y energética (Tortajada, 2015).

Actualmente, el embalse de Mulacorrall tiene como objetivo la regulación y dotación de caudal destinado a riego y agua potable para la ciudad de Ambato, además de garantizar el

*jorge.toapaxi@epn.edu.ec
Recibido: 20/08/2019
Aceptado: 06/07/2021
Publicado: 31/08/2021
10.33333/rp.vol48n1.05
CC 4.0

caudal ecológico (Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua, 2006 - HGPT).

Por otro lado, si bien es cierto, los beneficios que conlleva la construcción de una presa son numerosos, no se puede menospreciar que, la falla de una de estas estructuras ocasionaría daños en fauna, flora, infraestructura y pérdida de vidas humanas (Xiong, 2011). Específicamente, las inundaciones por rotura de presa han provocado desastres catastróficos para las vidas humanas, por lo que, los riesgos debido a esta causa, deben ser evaluados y mitigados cuidadosamente (Pen & Zhang, 2012).

Dentro de las causas de la falla de una presa se encuentran los factores hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos, sísmicos, estructurales, operacionales y sabotaje (Yen y Tang, 1979). De los cuales, el factor hidrológico destaca debido a que el cambio climático global tiene incidencia directa sobre éste, pudiendo ocasionar que los diseños en etapas de factibilidad no se adapten a las condiciones de operación (Soares-Frazão et al., 2012).

Respecto a los factores hidráulicos y estructurales, el mayor porcentaje de fallas se producen en presas de materiales sueltos (tierra y enrocado) con alturas de entre 15 a 30 metros y con periodos de funcionamiento mayor a 5 años (Marengo, 1996); características presentes en la presa Mulacorrall.

Con objeto de minimizar las posibles consecuencias de la falla de una presa, la modelación hidráulica del flujo post-rotura es un insumo importante para la creación de mecanismos de alerta temprana y evacuación de llanuras susceptibles a inundación (Begnudelli & Sanders, 2007; Xiong, 2011).

Para hacer frente a esta problemática, una de las opciones es el análisis mediante un modelo numérico computacional. La simulación numérica de inundaciones se desarrolla como un campo de investigación, debido al aumento de capacidades computacionales y a su disponibilidad (Prestininzi, 2008). En los últimos años, los ordenadores poseen un aumento exponencial en sus competencias sin incrementar su costo, haciendo que la modelación computacional sea una herramienta asequible y eficiente para simular el comportamiento de ríos durante avenidas (ShahiriParsa et al., 2016).

Dentro del amplio mercado de programas de modelación numérica, el programa HEC-RAS ha demostrado ser muy eficaz en la simulación de eventos de rotura de presas, proporcionando cálculos numéricos en una y dos dimensiones (Dasallas et al., 2019); así como también, en la capacidad de simular con precisión la propagación de inundaciones debido a este tipo de eventos, incluso en topografías empinadas y rugosas (Pilotti et al., 2020).

En el estudio, se consideró el planteamiento de escenarios hipotéticos, en los que se asume que el fallo de la presa no está asociado con algún evento sísmico o hidrológico, siendo el caudal disponible únicamente el almacenado en el embalse (4004630 millones de m^3 – cota de embalse de

3836 m.s.n.m). Este volumen es obtenido a partir de la información del modelo digital del terreno, cuyo valor es mayor en 14.42% con respecto al proporcionado por el HCPT (2006); no obstante, un mayor volumen de agua representa un margen de seguridad.

Aunque se han alcanzado mejoras significativas en la modelación numérica de rotura de presa, es importante mencionar que, debido a las limitaciones del modelo numérico, las hipótesis de cálculo y la información cartográfica disponible; no se puede garantizar la precisión de los resultados, por lo que el presente análisis es de carácter referencial.

En consecuencia, la presente investigación se plantea los siguientes objetivos:

- Determinar los calados (altura del nivel del agua) y velocidades máximas en las áreas probables de inundación producto del flujo post rotura de la presa.
- Establecer el escenario de rotura de presa más probable, mediante la comparación con información de eventos históricos contenidos en la literatura.
- Analizar el tránsito del hidrograma producido por la eventual falla de la presa, en puntos de control planteados desde el pie de la presa, hasta la periferia de la ciudad de Ambato.

2. CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA MULACORRAL Y SU ZONA DE INFLUENCIA

La Presa Mulacorrall está conformada por escollera (Figura 1), donde su cuerpo está compuesto por: un núcleo central, con material clasificado como grava limosa; filtros de grava arenosa, dispuestos en ambas caras de la presa; y espaldones compuestos por fragmentos rocosos, ubicados de menor a mayor granulometría, hacia los taludes de la presa. (Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua, 2006).

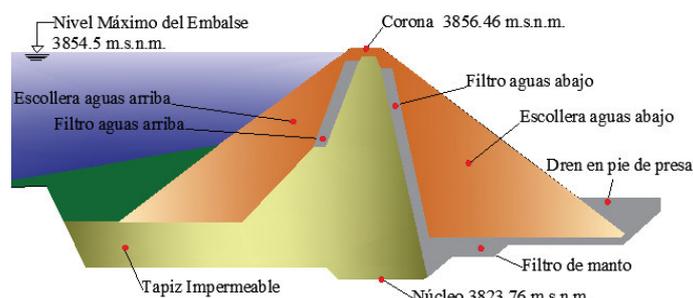


Figura 1. Vista lateral de la estructura de la presa Mulacorrall (HCPT, 2006)

El embalse de Mulacorrall tiene una capacidad máxima teórica de 3.5 millones de m^3 en su cota de coronación, con un área inundada de 36 hectáreas. El embalse se abastece de las derivaciones de El Sombrero y El Tingo, y del agua proveniente de la subcuenca de la quebrada Mulacorrall. El río de la Quebrada Mulacorrall se une 7.1 kilómetros aguas abajo con el río Calamaca, que junto al río Colorado dan origen al río Ambato; como se muestra en la Figura 2.

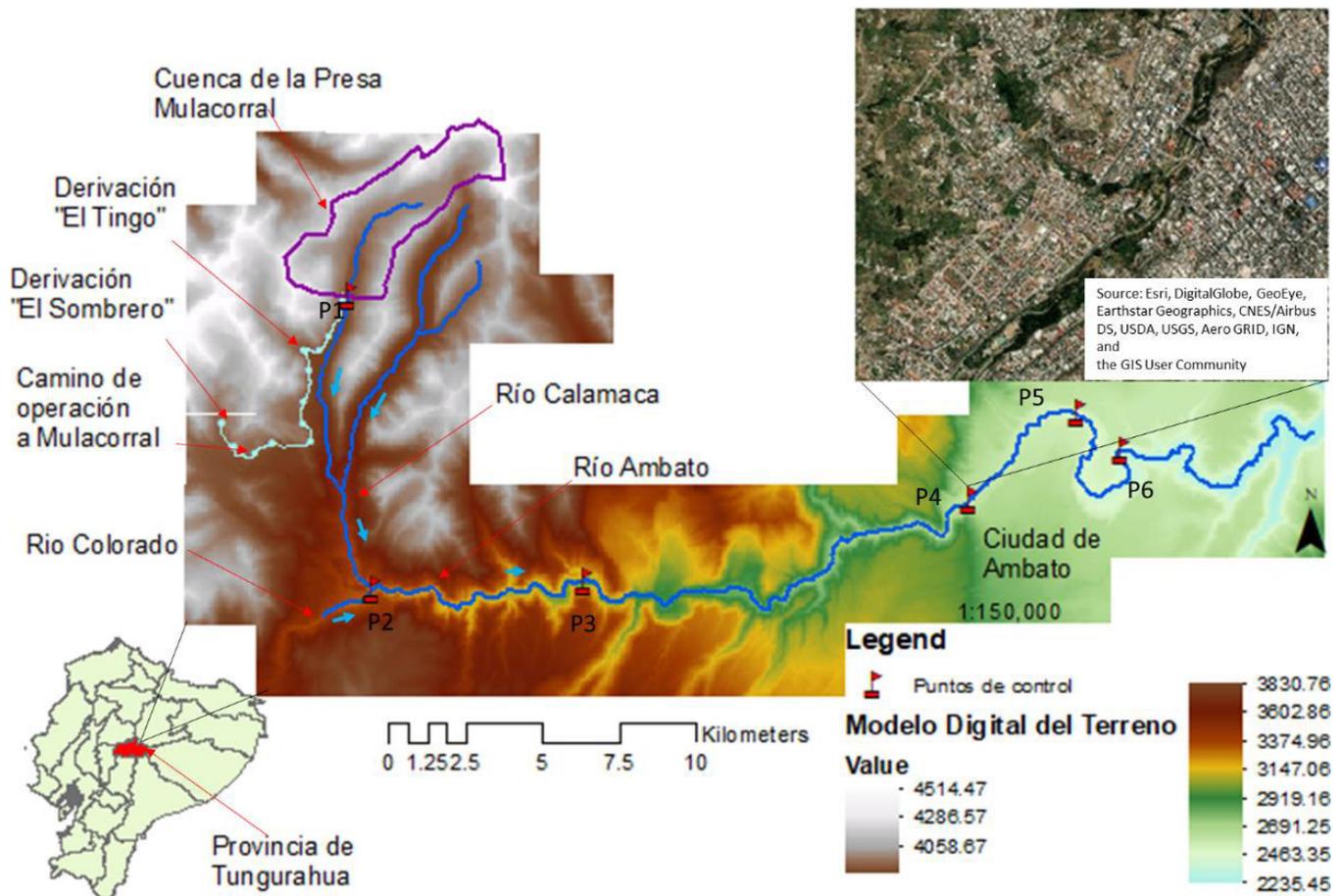


Figura 2. Área de estudio y zona de influencia de la Presa Mulacorral

La zona de influencia corresponde a un área de 1585.49 hectáreas, con una extensión de 50.00 kilómetros, medida desde el pie de la presa hasta la periferia de la ciudad de Ambato. Se definió cinco puntos dentro de la zona de estudio: pie de la presa (P1), inicio del río Ambato (P2), sistema de captación Ambato-Huachi-Pelileo (P3), puente Jaramillo entrada de la ciudad de Ambato (P4), sector “El Socavón” (P5) y puente “Curvo” (P6); cuyas coordenadas y elevación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de puntos de control (WGS 84 - zona 17 S)

Referencia	Código	Coordenada UTM		Elevación msnm
		X	Y	
Pie de la Presa	P1	741801 E	9867862 S	3846
Origen río Ambato	P2	742595 E	9858298 S	3266
Captación A. H. P.	P3	749473 E	9858527 S	3004
Pte. Jaramillo	P4	762004 E	9861195 S	2587
Sector "Socavón"	P5	765493 E	9864053 S	2477
Pte. "Curvo"	P6	766957 E	9862840 S	2401

En inspecciones realizadas en la zona de estudio, se constató: un total de 23 puentes, ubicados a lo largo del río Ambato; además de infraestructura localizada en los márgenes de una avenida hipotética, como: el Sistema de Captación Ambato-Huachi-Pelileo, la vía Flores (principal acceso a la presa Mulacorral y Chiquiurcu), la Planta de

Tratamiento de Agua Potable de Tilulún, el parque Luis A. Martínez y la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

3. SÍNTESIS DEL ESQUEMA NUMÉRICO UTILIZADO POR HEC-RAS

El uso de un programa de simulación numérica exige al usuario el entendimiento de los conceptos y algoritmos matemáticos, que el modelo emplea en la resolución de los problemas de ingeniería. HEC-RAS utiliza las ecuaciones de Saint Venant, las cuales son una derivación de la ecuación de Navier Stokes, y corresponden a un conjunto formado por las ecuaciones de Continuidad y Momentum (Hydrologic Engineering Center, 2016).

3.1. Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad establece que, para diferentes secciones en un mismo canal, el caudal se mantiene constante en función del tiempo y del espacio; es decir, el caudal que entra a una sección de control debe ser igual al caudal que sale de dicha sección (Chow, 1994b).

$$\frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} \rho dV + \iint_{s.c.} \rho V \cdot dA = 0 \quad (1)$$

Donde:

$\frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} \rho dV$: representa la región espacial (volumen de control v.c.) ocupada por el fluido.

$\iint_{s.c.} \rho V \cdot dA$: representa las condiciones de entrada/salida dentro de una sección de control

3.2. Ecuación de Momentum

Si se considera una presión hidrostática basándonos en: que la longitud horizontal es mucho mayor que la longitud vertical, la ausencia de cambios en la densidad y la ausencia de fuerza del viento; se puede llegar a la conclusión, que los términos de velocidad en el eje z pueden ser despreciados, obteniendo de esta manera las ecuaciones de cantidad de momentum (Chow, 1994).

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2)$$

Donde:

$\frac{\partial V}{\partial t}$: Término de aceleración local

$V \frac{\partial V}{\partial x}$: Término de aceleración convectiva

$g \frac{\partial y}{\partial x}$: Término de fuerza de presión

$g(S_0 - S_f)$: Término de aceleración gravitacional y fricción

HEC-RAS utiliza dos esquemas para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant, el primero ellos, “Full Momentum” resuelve las ecuaciones de cantidad de momentum sin omitir ningún término. El segundo, corresponde al Método de Onda Difusa o “Diffusion Wave”, éste omite los términos de aceleración local y convectiva (Chow, 1994). En problemas relativamente simples, el modelo de onda difusa presenta tiempos de cómputo menores y resultados similares al método de Full Momentum. Sin embargo, en problemas que presenten cambios bruscos en la geometría, se recomienda de Full Momentum (Hydrologic Engineering Center, 2016).

4. METODOLOGÍA

Sabat (2015) propuso un modelo y el diagrama de flujo para el análisis numérico del flujo inducido por el rompimiento de una presa, resolviendo las ecuaciones de Saint Venant 2D y considerando el método de volúmenes finitos. De manera similar, en este estudio se ha propuesto un diagrama de flujo (Figura 5), que contempla los pasos necesarios para modelar la inundación debido a la rotura de una presa en HEC-RAS 2D, el mismo que se fundamenta en los manuales presentados por el Hydrologic Engineering Center (2018).

4.1. Información Cartográfica

En el modelo, se consideró la siguiente información cartográfica:

- Cartas topográficas a escala 1:50000, obtenidas de la base de datos del repositorio digital del Instituto Geográfico Militar (2012).
- Modelos digitales del terreno (mdt), de precisión altimétrica igual a 1.5 m, con una definición de 3

por 3 m y 5 por 5 m, bajo el sistema de coordenadas WGS_1984_UTM_Zone_17S; obtenidos del repositorio digital del Ministerio de Agricultura y Ganadería (2019).

La capa se procesó mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), ArcMap, con el objeto de delimitar una posible zona de inundación. Es importante mencionar que, después de corridas preliminares en HEC-RAS 2D, la capa raster tuvo que ser corregida en el programa ArcMap, ya que existían zonas irreales de acumulación de agua.

En el modelo se estableció un mallado estructurado, correspondiente al área de influencia, el cual se encuentra conectado al área de almacenamiento (aguas arriba de la presa). Las características de la presa y el embalse utilizadas en la modelación se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de la presa Mulacorral utilizadas en el modelo

Descripción	
Altura de la presa, m	23.01
Volumen del embalse, m ³	4004630.00
Ancho Promedio, m	58.00
Talud aguas arriba	2H:1V
Talud aguas abajo	2H:1V

4.2. Tipo de Flujo

Previo a la introducción de datos hidráulicos, es importante analizar las condiciones del flujo a simular con el fin de configurar de manera correcta el modelo. A continuación, un resumen del tipo y estado del flujo según Chow (1994a):

- Tipo de flujo: el flujo producto de la rotura de una presa no presenta un caudal constante en función del tiempo y espacio, por lo cual, se ha clasificado como un flujo discontinuo rápidamente variado.
- Régimen del flujo: esta clasificación es función de las fuerzas inerciales, de viscosidad y gravedad. En este caso, se puede presentar fluctuaciones entre el flujo subcrítico y el supercrítico, a lo largo del río.

Cabe mencionar que las modelaciones consideran únicamente las características (propiedades físicas) del fluido agua y no una mezcla agua-sedimento (fluido no newtoniano); es decir, no contempla cambios de la viscosidad dinámica y cinemática, condición que a priori, se traduce en un aumento en la incertidumbre de los resultados, principalmente en la zona aguas abajo de la presa.

4.3. Condiciones Inicial y de Contornos

Debido a la escala del evento a simular, se asume como condición inicial en la zona susceptible de inundación (aguas abajo de la presa), una la profundidad de agua igual a cero, es decir, una superficie de terreno seca.

Se consideró como condición de contorno aguas abajo a la profundidad normal, mediante el ingreso de la pendiente del

cauce de la sección final (Figura 3). Para ello, se utilizó el procedimiento para el cálculo de pendientes en ríos, empleado por Monsalve (1995). Es importante mencionar que, no se consideró a ríos aportantes los cuales presentan un caudal intrascendente en comparación al caudal producido post rotura.

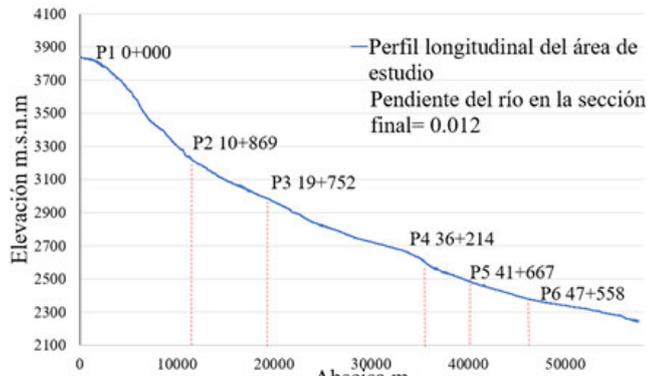


Figura 3. Perfil longitudinal del tramo de estudio

Como condición aguas arriba, se definió el área del embalse, con un volumen correspondiente a la elevación máxima de agua en el embalse (cota de la corona). Es importante indicar que, la presa Mulacorral tiene un vertedero de excesos capaz de evacuar $23 \text{ m}^3/\text{s}$ y una tubería de toma que permite captar $4.14 \text{ m}^3/\text{s}$ en su máximo nivel de operación; no obstante, con el objetivo de presentar el caso más desfavorable, no se consideró estas descargas.

4.4. Coeficiente de Rugosidad

La calibración de un modelo numérico de inundaciones, fundamentalmente consiste en asignar un valor para el coeficiente de rugosidad (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011). Esto se debe a que, el coeficiente de rugosidad influye directamente en los resultados de velocidad y profundidad de agua; por lo tanto, su determinación es de gran importancia en la configuración del modelo.

El proyecto de Mulacorral se diferencia de otros estudios como el de Pilotti et al. (2020) o Dasallas et al. (2019), debido a que carece de un evento histórico o modelo físico con el que se pueda comparar el coeficiente de rugosidad. Bajo esta condición, se tomó en cuenta la información de la literatura técnica, se definió el tamaño del mallado y se discretizó nueve zonas con diferentes valores de rugosidad.

Se utilizó la ecuación de Cowan para definir el valor del coeficiente de rugosidad "n" de Manning, la cual, utiliza variables respecto a: el material del canal, grado de irregularidad, variaciones en la sección transversal, efecto de obstrucciones, vegetación y efectos de meandros (Cowan 1956, Chow 1994a).

Adicional, siguiendo las recomendaciones del Hydrologic Engineering Center (2014), se consideró establecer un coeficiente de rugosidad que simule la turbulencia en la zona inmediatamente aguas abajo de la presa; además, se

asignó un coeficiente que considere la infraestructura en las orillas del río Ambato y en la zona de probable inundación, como lo establece el Engineers Australia (2012). En la Figura 4, se muestran las nueve zonas definidas con su respectiva rugosidad.

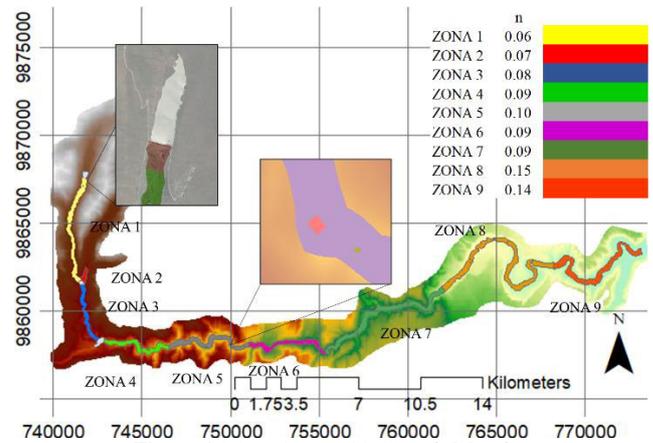


Figura 4. Mapa de rugosidad "n" de Manning

4.5. Generación de la Brecha

Los parámetros que inciden en el cálculo del hidrograma de salida de la presa, dependen de: su modo de falla, características de la brecha y tiempo de formación (Hydrologic Engineering Center, 1980). En afán de abarcar el mayor número de escenarios, se trabajó con las ecuaciones: Guía Técnica-1996 (Ministerio de Medio Ambiente, 2001); Froehlich (2008), MacDonald & Langridge-Monopolis (1984), Von-Thun & Gillette (1990) y Xu & Zhang (2009). Las cuatro últimas están incorporadas en el programa HEC-RAS 5.0.7 (Hydrologic Engineering Center, 2016).

A continuación, se exponen las consideraciones tomadas para el ingreso de datos referente a la formación de la brecha:

- Para el caso de una presa de materiales sueltos el tiempo de formación de la brecha es progresivo.
- El centro y elevación del fondo de la brecha son consideraciones específicas, que dependen del modelador y de las características de la presa. Para este caso se ha considerado que el centro de la brecha se encuentre en el eje de la presa y que el fondo de la brecha corresponde al nivel más bajo del mdt.

Los valores obtenidos mediante las ecuaciones descritas, se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Tiempo de formación y geometría de la brecha; a) presa con alta erosionabilidad, b) presa con baja erosionabilidad

Ecuación	Ancho (m)	Tiempo de formación (horas)	Pendiente de taludes
Guía Técnica	38.96	0.42	1H:1V
Froehlich (2008) desborde	30.00	0.51	1H:1V
Froehlich (2008) tubificación	24.00	0.50	0.7H:1V
MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)	10.00	0.66	0.5H:1V
Von Thun & Gillette (1990) a	62.00	0.33	0.5H:1V
Xu & Zhang (2009) a	54.00	0.55	2.01H:1V
Von Thun & Gillette (1990) b	62.00	0.50	0.69H:1V
Xu & Zhang (2009) b	29.00	3.26	0.96H:1V

4.6. Análisis de Sensibilidad

4.6.1. Balance del Volumen de Agua

Como lo establece Wang (2020), un análisis de equilibrio del volumen del agua es fundamental para establecer la coherencia de un modelo numérico. Para definir el mdt que utilizó este análisis, se modeló y calculó el volumen acumulado con el mdt de 3 por 3 m y con el de 5 por 5 m, en iguales condiciones y tolerancias del programa. En la Tabla 4, se muestran los resultados del volumen acumulado, para los puntos de control P1, P2, P3 y P4.

Tabla 4. Balance de agua para los mdt de 3 por 3 m y 5 por 5 m

	mdt 3x3		mdt 5x5	
	Volumen acumulado m ³	Error relativo %	Volumen acumulado m ³	Error relativo %
P1	4004377	0.01	3993793	0.27
P2	3988199	0.41	3522588	12.04
P3	3929828	1.87	3483256	13.02
P4	3759947	6.11	1778944	55.58

En el modelo con el mdt de 3 por 3 m, se puede observar que el error en el balance del volumen de agua en el punto P4 es del 6.11%, por otra parte, el de 5 por 5 m mostró un desfase de más del 55%, lo cual se atribuye a la baja definición del mdt en las riberas del río Ambato, produciendo acumulación de agua.

4.6.2. Tamaño de Celda

Como lo establece el Hydrologic Engineering Center (2018), HEC-RAS permite obtener resultados similares con diferentes tamaños de celda en el mallado. En este sentido, con el objeto de establecer la relación adecuada entre tamaño de celda y tiempo de cómputo, se realizaron simulaciones con el mdt de 3 por 3 m, para un mallado de 6 por 6 m y 12 por 12 m de tamaño de celda. En la Tabla 5, se

muestran para los puntos P1, P3 y P4, los resultados de calados, velocidad y caudal pico en función del tiempo.

Se puede observar que los valores de velocidad y calado son similares, con base en esto y al tiempo de cómputo, 4 veces menor, se determinó que la malla con celdas de 12 por 12 m presenta mejor relación entre tamaño de celda y tiempo de procesamiento. De igual manera, se puede verificar que los caudales pico presentan la misma evolución a través del río.

Tabla 5. Comparación de mallas (tamaño de celda) en función de la velocidad, calado, caudal y tiempo de cómputo

	Celda 6x6 tiempo cómputo: 4horas:10 min			Celda 12x12 tiempo cómputo: 1hora:10min		
	Velocidad m/s	Calado m	Caudal Pico m ³ /s	Velocidad m/s	Calado m	Caudal Pico m ³ /s
P1	7.95	8.59	4609	6.33	8.74	4615
P3	7.15	11.45	2292	6.94	11.28	2371
P4	3.51	6.97	1057	3.73	7.15	1307

Los análisis de sensibilidad fueron desarrollados en un ordenador con las características que se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Características del computador utilizado en la modelación

Modelo	Intel® core™ i7-8700 CPU @3.2GHz 3.19 Hhz
Núcleos	6.00
RAM	16.00 GB
Sistema Operativo	Windows 10
Procesador	64.00 bits

Como lo establece el Hydrologic Engineering Center (2016), la base fundamental para obtener un modelo hidráulico confiable es la calidad y confiabilidad de información topográfica a utilizar. El hecho de realizar un mallado fino en un mdt de baja calidad, será contraproducente para el estudio, por este motivo, el modelo bidimensional se trabajó en función del mdt de 3 por 3 m y con un mallado de 12 por 12 m.

La Figura 5 presenta el diagrama de flujo que sintetiza el desarrollo de la metodología planteada en este análisis.

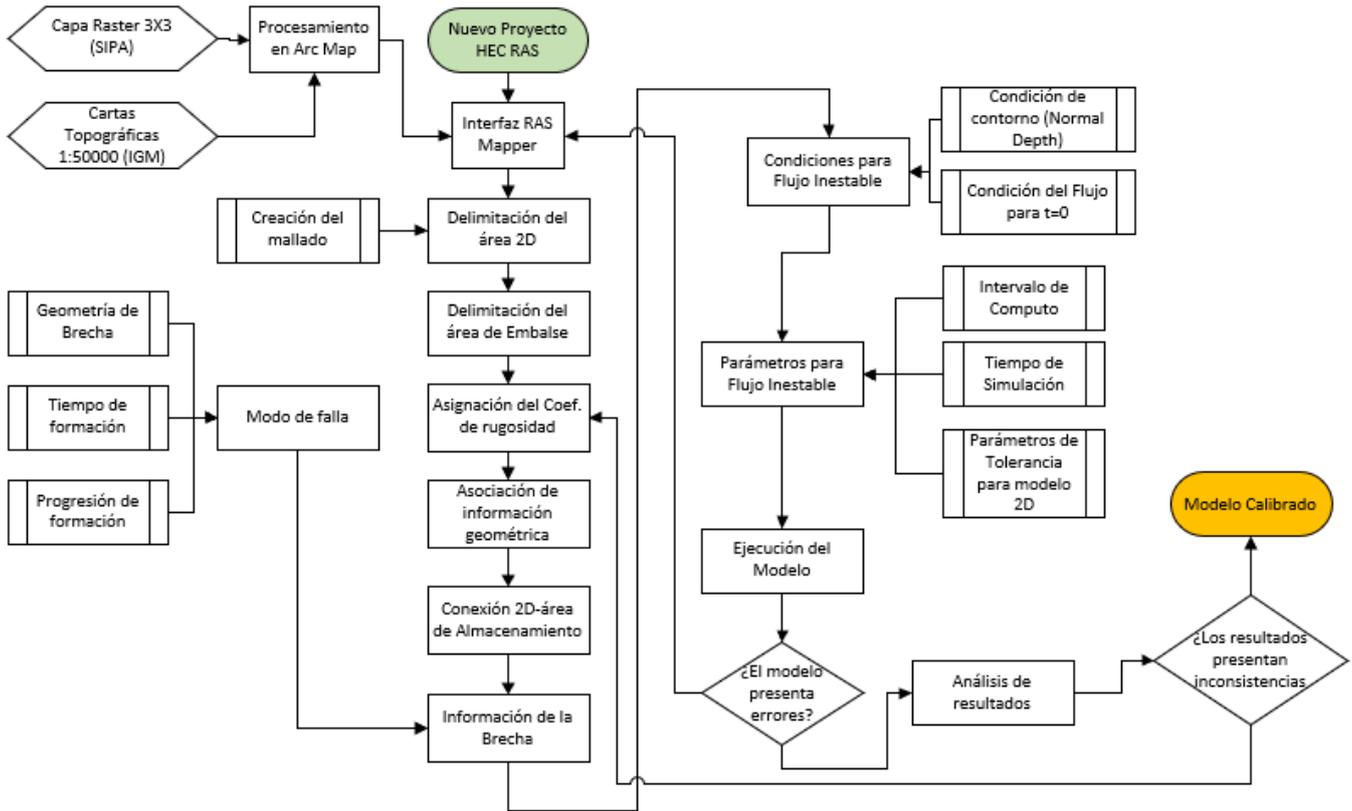


Figura 5. Diagrama de flujo de un modelo de inundación por rotura de presa en HEC RAS-2D

5. MODELACIÓN DE ESCENARIOS

Se plantearon diez escenarios para analizar el caudal pico en distintos puntos de control. Posteriormente, se obtuvo el error absoluto para determinar los escenarios más y menos desfavorables; los casos tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Modo de falla
- Ecuación de resolución del modelo numérico
- Ecuación de regresión para formación de brecha

5.1. Modo de falla - Desborde y Tubificación

Se planteó la utilización de la ecuación de Froehlich-2008 (Hydrologic Engineering Center, 2016) para definir la formación de la brecha por tubificación y desborde. Se utilizó la ecuación descrita por Froehlich ya que como cita Rodríguez et al. (2015), ésta ecuación representa de mejor manera la formación de brechas en presas zonificadas. La Figura 6, muestra que el caudal pico en P1 presentó una diferencia de 1073 m³/s, comparando el modo de falla de desborde con el de tubificación, esta diferencia disminuye conforme avanza la avenida hasta P4, donde la diferencia es del 5.48% y con un desfase de llegada de 7 minutos.

Es importante indicar que la distribución de los hidrogramas para ambos modelos, cumple con el balance de volumen de agua.

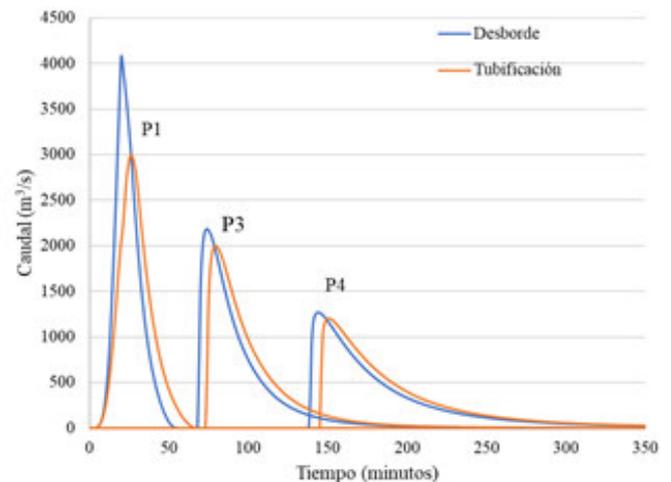


Figura 6. Hidrogramas producidos por desborde y tubificación en los puntos de control P1, P3 y P4

5.2. Resolución del modelo numérico

Los modelos numéricos que maneja HEC-RAS son el método de “Full Momentum” y “Diffusion Wave” (Hydrologic Engineering Center, 2018). Se puede apreciar en la Figura 7 que, para P1 ambos modelos presentan hidrogramas que se superponen. Sin embargo, en el punto de control P2 el modelo de “Diffusion Wave” presenta inestabilidad. Esto concuerda con lo mencionado por el Hydrologic Engineering Center (2016), la resolución por el método de “Full Momentum” alcanza una mayor precisión y estabilidad en problemas de mayor complejidad. Cabe

indicar que ambos modelos compartieron las mismas condiciones de borde y mdt, por lo cual se descarta una falla de modelo de Diffusion Wave por estas condiciones.

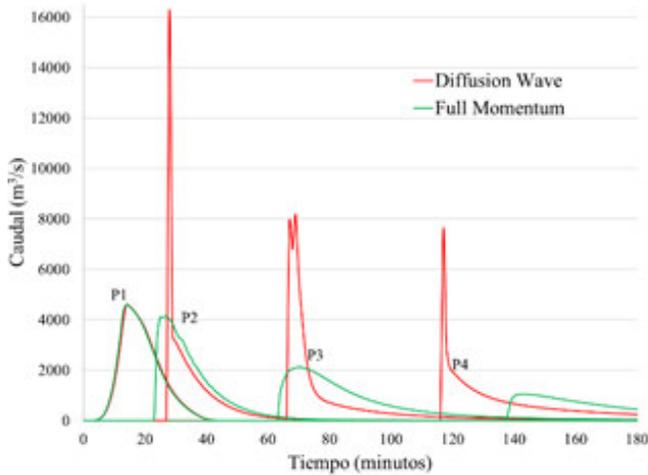


Figura 7. Hidrogramas aplicando el método de “Full Momentum” y “Diffusion Wave” en los puntos de control P1, P2, P3 y P4

5.3. Ecuación de Regresión

Para la indagación de los efectos debido a la ecuación de regresión para formación de brecha, se realizó una sub clasificación entorno a efectos de erosión en el cuerpo de la presa. La Figura 8 muestra los hidrogramas para diferentes ecuaciones de geometría y tiempo de formación de la brecha, en función del volumen de almacenamiento y dimensiones geométricas de la presa y sin contar con factores de erosión.

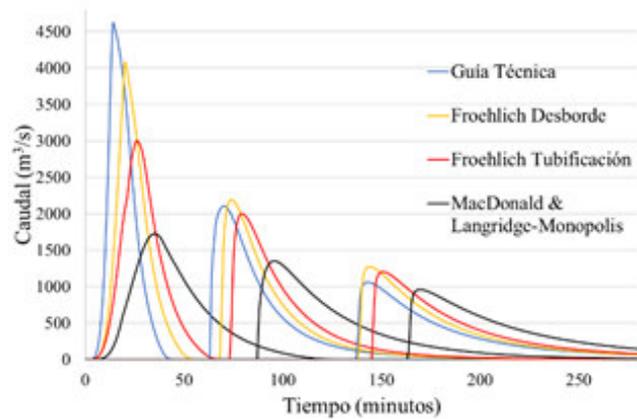


Figura 8. Hidrogramas en los puntos de control P1, P2, P3 y P4, utilizando ecuaciones con base en la geometría y el volumen de almacenamiento

En la Figura 8, se puede observar un caudal pico máximo de 4616.53 m³/s para la ecuación de la Guía Técnica y un caudal pico mínimo de 1723.91 m³/s correspondiente a la ecuación de MacDonald & Lantridge-Monopolis (1984). Sin embargo, para P4 las ecuaciones presentan una diferencia de picos de caudal entre 1264 y 959 m³/s y un desfase de 24 minutos.

Por otro lado, la Figura 9 servirá para establecer las diferencias entre una presa construida técnicamente (menor erosión) y una presa construida sin fundamento ingenieril o

formada de forma natural (mayor erosión). Estas ecuaciones consideran efectos de erosión, características geométricas y volumen de almacenamiento. Esta figura muestra una evolución gradual de manera similar, sin embargo, la ecuación de Xu & Zhang (2009) para una presa con poca erosión, presenta un tiempo extendido en la formación de la brecha.

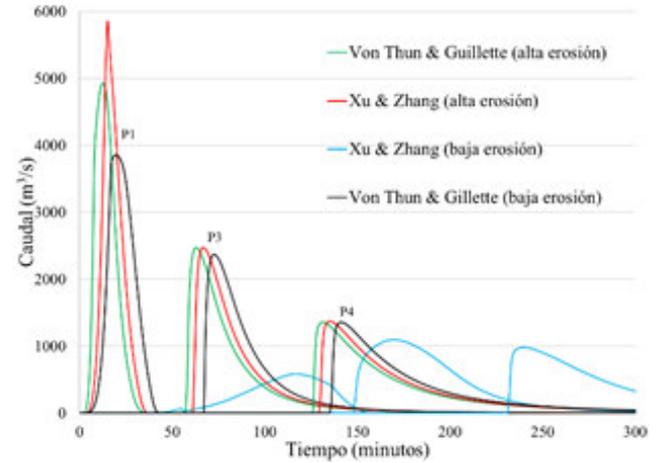


Figura 9. Hidrogramas en los puntos de control P1, P2, P3 y P4 utilizando ecuaciones con base en efectos de erosión

En la Figura 10, se plantea el proceso entorno a la modelación de los distintos escenarios de rotura para la presa Mulacorral.

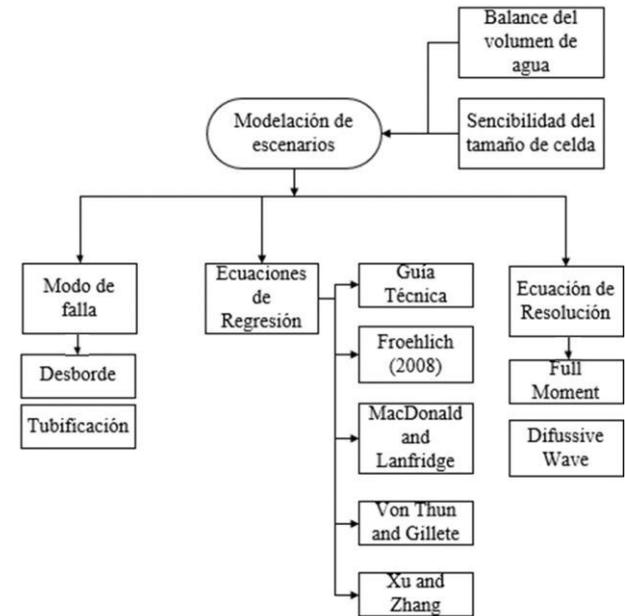


Figura 10. Escenarios de rotura para la presa Mulacorral

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Caudales Pico

La Tabla 7 resume los caudales pico obtenidos de los planes de modelación en el punto de control P1 (pie de la presa). En la misma, se calculó el error absoluto para establecer un intervalo de resultados. En base al error absoluto y asumiendo como correcto al valor de caudal pico promedio, se podría expresar nuestro margen de error es 3577.47 ±

613.83 m³/s; con base en este criterio los caudales pico que representan al modelo son los obtenidos mediante las ecuaciones de Froehlich (2008) y Von-Thun & Gillette (1990) b.

Tabla 7. Caudales pico para los escenarios de rotura de la presa Mulacorral en el punto P1

n	Ecuación	Caudal Pico (m ³ /s)	x-xm	(x-xm) ^2
1	Guía Técnica	4616.5	1039.1	1079644.1
2	Froehlich (2008) desborde	4073.4	496.0	245994.4
3	Froehlich (2008) tubificación	2999.7	-577.8	333838.3
4	MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)	1723.9	-1853.6	3435675.6
5	Von Thun & Gillette (1990)	4914.6	1337.1	1787952.1
6	Xu & Zhang (2009)	5851.4	2273.9	5170678.3
7	Von Thun & Gillette (1990) b	3857.3	279.9	78328.1
8	Xu & Zhang (2009) b	582.9	-2994.6	8967748.0
	xm=	3577.47	Σ=	21099858.96

$$e = \sqrt{\frac{\sum(x - xm)^2}{n(n - 1)}}$$

$$e = \sqrt{\frac{21099858.96}{8(8 - 1)}}$$

$$e = 613.83 \text{ m}^3/\text{s}$$

Considerando que los hidrogramas de ambas ecuaciones convergen en el punto de control P4 y con base en el criterio del Bureau of Reclamation (1998) de adoptar el escenario más desfavorable, se presenta el modelo de Froehlich por desborde, ya que muestra magnitudes mayores y representaría resultados más conservadores.

La Figura 11 presenta la relación entre caudales picos observados y calculados por la ecuación de Froehlich (rojo) obtenidos del registro del Bureau of Reclamation (1998). En esta gráfica se ha incorporado los caudales pico obtenidos en la modelación y calculados con la ecuación mencionada (color azul). A pesar de que, el modelo de tubificación se encuentra más cerca de la línea de tendencia, se escoge el escenario por desborde por el fundamento planteado anteriormente.

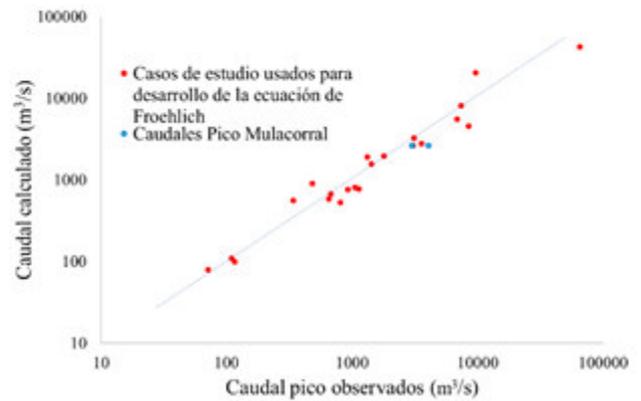


Figura 11. Caudales pico observados y calculados usando la ecuación de Froehlich (1995), extraída de Dam Safety Office (1998); y caudales pico Mulacorral

6.2. Velocidades y Calados

Se estima que la avenida ingresa a la ciudad en el sector del Puente Jaramillo (P4) a las 2 horas con 20 minutos con un calado de 6.67 metros y una velocidad de 3.35 m/s. A las 2 horas con 53 minutos, la onda llega al sector de “El Socavón” (P5), con un calado 5.31 metros y una velocidad de 2.72 m/s. A las 3 horas y 42 minutos de iniciarse la falla de la presa, el flujo llega a la periferia de Ambato, al pte. “Curvo” (P6), donde se presenta una altura de agua de 4.16 metros y una velocidad de 2.55 m/s.

En la Figura 12, se observa el paso del flujo post rotura por la ciudad de Ambato, apreciándose que debido a la lejanía de la presa Mulacorral, el centro con más densidad poblacional no es afectado. Sin embargo, las riberas del río y la infraestructura que se encuentra dentro de sus márgenes, presenta calados entre 7 y 5 metros de altura.

De forma simultánea, la Figura 13 presenta los resultados de velocidades para cada punto de control ubicados en la ciudad de Ambato, los cuales están en un rango de 2 a 3 m/s.

El resumen de los valores máximos para calado y velocidad se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Cuadro de velocidades y calados máximos para el modo de falla por desborde de la presa Mulacorral

Control	Velocidad máx. m/s	Calado máx. m
P1	5.90	8.29
P2	11.32	11.00
P3	6.83	10.76
P4	3.73	7.08
P5	3.12	5.55
P6	2.02	5.86

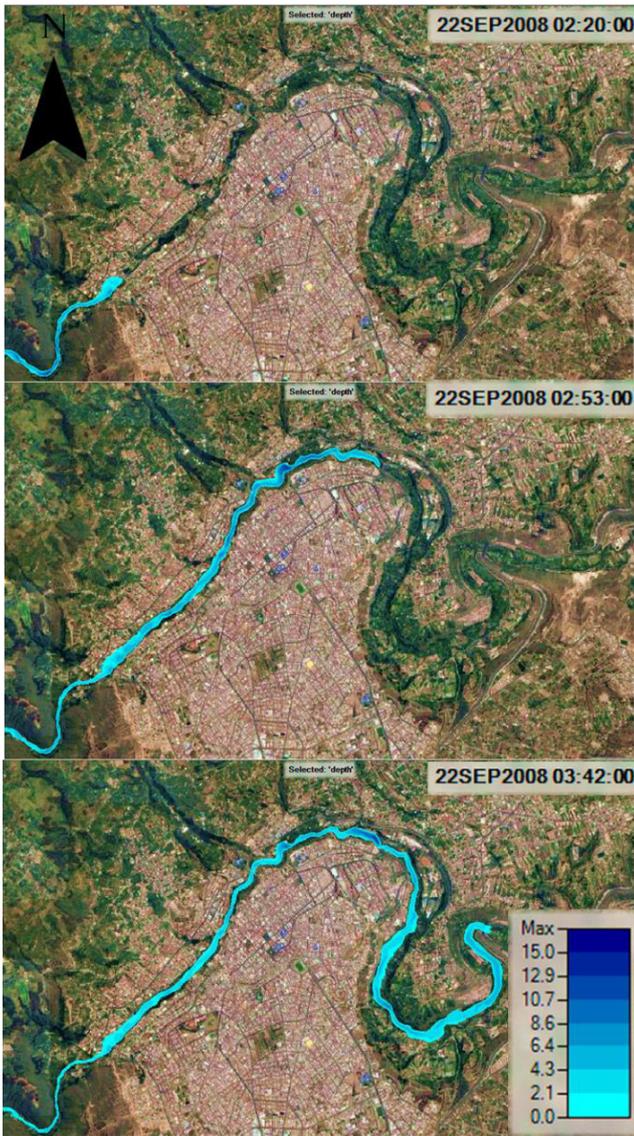


Figura 12. Mapa de calados del modelo de inundación por rotura de la presa Mulacorral

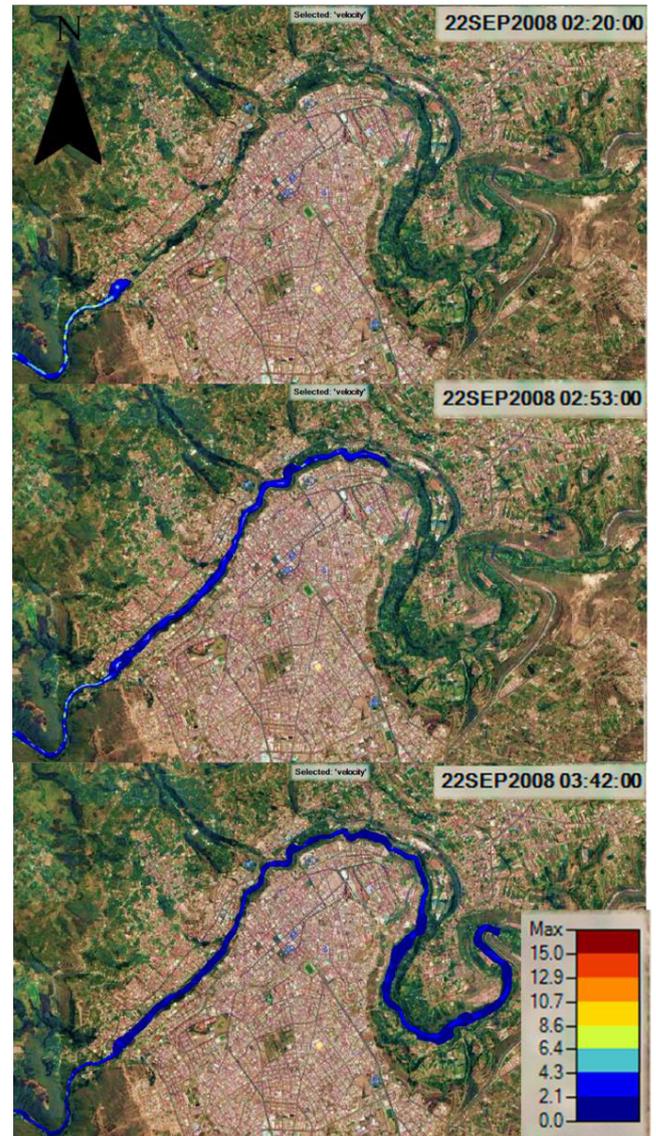


Figura 13. Mapa de velocidades del modelo de inundación por rotura de la presa Mulacorral

6.3. Hidrogramas de llegada a la ciudad de Ambato

La Figura 14 muestra la atenuación de la onda de crecida, desde el pie de la presa (P1) hasta el puente “Curvo” (P6). Se presentan valores de 1271 m³/s en el puente Jaramillo, hasta 731 m³/s en el puente “Curvo”, a 47 kilómetros de distancia de la presa.

Considerando una relación simple entre longitud y tiempo que en llegar hasta la ciudad de Ambato, se puede obtener un valor de la velocidad con la que viaja la onda de 12 km/h.

6.4. Área potencialmente afectada

Se debe tener en consideración que valores de calado mayor a 1 metro de altura y velocidad mayor a 1 m/s representan riesgo potencial a vidas humanas, daños en infraestructura y ambiente (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011). HEC-RAS permite obtener esta razón de velocidad y calado misma que se muestra en la Figura 15.

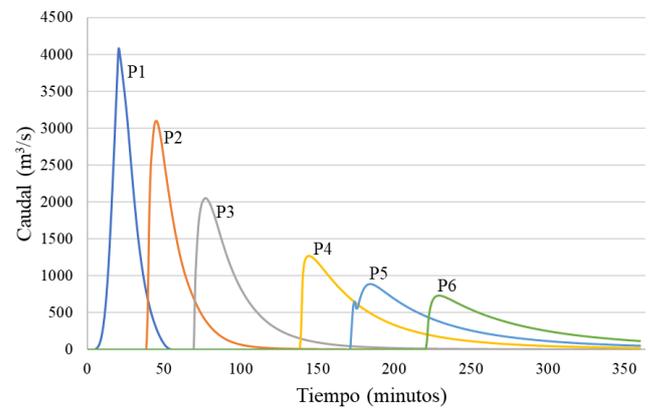


Figura 14. Atenuación de la onda de crecida, desde el punto P1 hasta el punto P6

El estudio refleja un área de inundación correspondiente a 566 hectáreas, repartidas en las riberas del río Ambato, con un alcance aproximado de 50 metros a ambos lados del eje del río. No obstante, este dependerá de la morfología del río y los taludes de la zona.

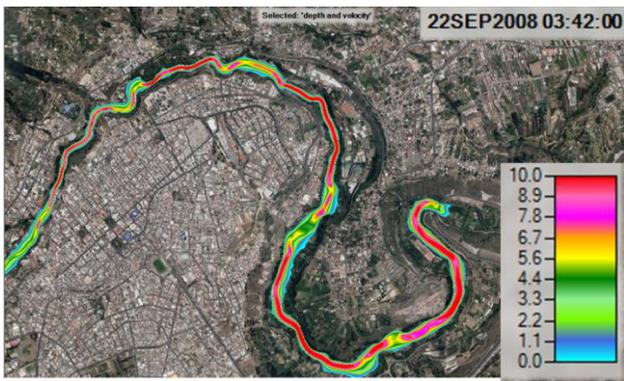


Figura 15. Mapa de velocidad x calado ciudad de Ambato

La Figura 16 muestra la variación del régimen de flujo entre el punto de control P1 y P2, a 36 minutos de haberse iniciado el proceso de falla de la presa. Se verifica de acuerdo a la literatura que, conforme transita el frente de onda, el régimen de flujo pasa de un estado supercrítico a un estado subcrítico (Toro, 2001; Prestininzi, 2008).

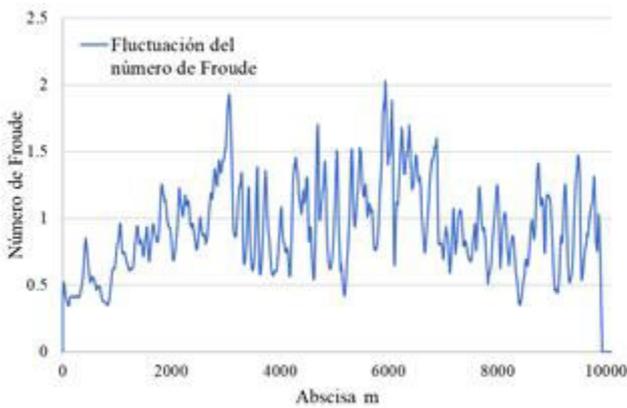


Figura 16. Régimen de flujo rotura de la presa Mulacorral. Desde P1 hasta P2, t=36 minutos.

Para finalizar, las Figuras 17 y 18, presentan la ubicación de los puntos de control y la visualización en tres dimensiones, utilizando la herramienta de 3D View incorporada en versión 5.0.7 de HEC-RAS.

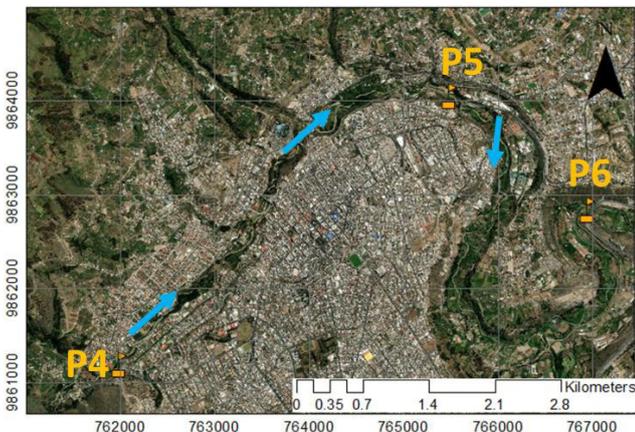


Figura 17. Ubicación de puntos de control en la ciudad de Ambato

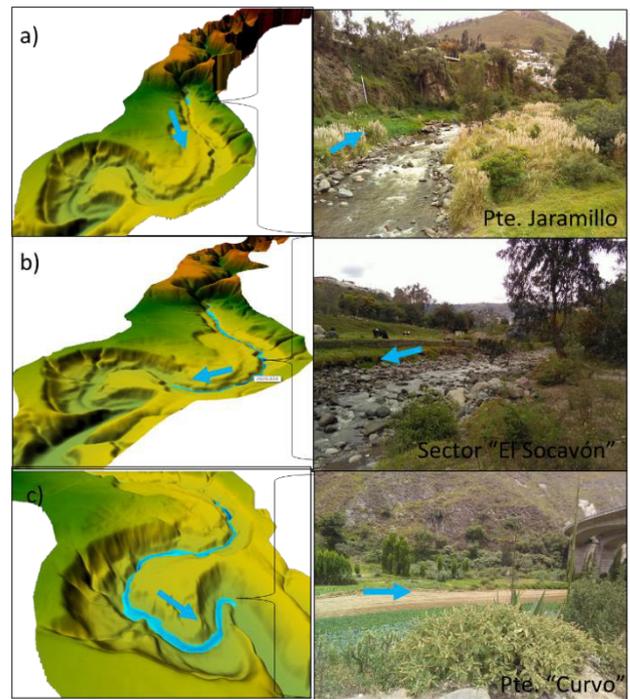


Figura 18. a) Entrada de la ciudad de Ambato Pte. Jaramillo tiempo de llegada de la avenida 2 horas 20 minutos, b) Sector "El Socavón" tiempo de llegada de la avenida 2 horas 53 minutos, c) Periferia de la ciudad de Ambato Pte. "Curvo" tiempo de llegada 3 horas con 42 minutos

7. CONCLUSIONES

Los rangos de velocidad, niveles de agua y caudales pico obtenidos mediante HEC-RAS, fueron comparados con fórmulas empíricas que se fundamentan en información de eventos históricos. Por lo tanto, este estudio se concibe como un análisis que muestra resultados referenciales, más no con fines de diseño o construcción de infraestructura.

La evolución de los hidrogramas mostró que las condiciones iniciales de formación de la brecha, tienen poca influencia en lugares que se encuentran alejados del evento de falla.

Los resultados de caudal pico obtenidos concuerdan con lo dicho por Wahl (2014), donde se establece estadísticamente que las ecuaciones de Froehlich (2008), Von-Thun & Gillette (1990), son mejores para predecir el tiempo de formación de la brecha. Por otra parte, la ecuación de Xu y Zhang (2009) presenta tiempos significativamente más largos, en este caso el tiempo de llegada de la onda a la ciudad de Ambato, con un desfase de 4 horas en relación a los otros modelos.

Un mallado bidimensional en una zona con pendientes encañonadas, como se dio en este caso, demandará de más gastos computacionales, los cuales pueden ser optimizados realizando una sección de una dimensión, siempre y cuando se haya comprobado que los modelos bidimensionales y unidimensionales presenten resultados relativamente iguales.

Se contempla una afectación directa el 65 % de la Vía Flores, debido al calado y la velocidad alcanzados en las riberas del río. Esto aumentará el tiempo de respuesta de

acciones de ayuda en los poblados afectados en la zona media y alta del río Ambato en el hipotético caso de la rotura de la presa Mulacorral.

En caso de tener una zona extensa de estudio, donde se encuentren diferentes tipos de sustratos y características geométricas y morfológicas, se recomienda zonificar el mdt con el objeto de representar las condiciones del terreno, los cuales en áreas extensas evidentemente varía debido a tipo de vegetación de la zona y morfología del río.

Respecto al tiempo de llegada de la avenida a la ciudad de Ambato, no se presentan mayores discrepancias, por lo cual, el tiempo que tarde en la onda en recorrer la longitud aproximada de 36.2 kilómetros, desde presa Mulacorral hasta alcanzar el puente Jaramillo, es de 2 horas 20 minutos con un caudal pico de 1200 m³/s.

Es importante indicar que, el mdt utilizado para el mallado debe ser validado con el fin de evitar estancamientos de agua que produzcan una disminución en el caudal pico del hidrograma de llegada, así como también retardos de la avenida. Es desafortunado trabajar con un mallado fino en un mdt de baja calidad.

A futuro, con base en este estudio, se puede profundizar en el análisis incluyendo en los escenarios, otros factores que generen o incidan en la rotura de la presa, como: cambio climático, eventos hidrológicos o eventos sísmicos.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Honorable Consejo Provincial de Tungurahua por las facilidades brindadas para el desarrollo de este estudio.

REFERENCIAS

- Altinbilek, D. (2002). The Role of Dams in Development, *International Journal of Water Resources Development*, 18:1, 9-24, DOI: 10.1080/07900620220121620
- Begnudelli, L., & Sanders, B. (2007). Simulation of the St. Francis Dam-Break Flood. *Journal of Engineering Mechanics* 2007-11-01 133(11): 1200-1212, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:11(1200)
- Bureau of Reclamation, (1998). *Prediction of Embankment Dam Breach Parameters, A Literature Review and Needs Assessment, DSO-98-004*, United States Department of the Interior, Dam Safety Office.
- Chow, V. (1994a). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá Colombia: McGRAW HILL.
- Chow, V. (1994b). *Hidrología Aplicada*. Bogotá Colombia: McGRAW HILL.
- Dasallas, L., Kim, Y., An, H. (2019). Case Study of HEC-RAS 1D-2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea. *Water* 2019, 11(10), 2048. <https://doi.org/10.3390/w11102048>
- Engineers Australia Water Engineering (2012). *Revision Project 15: Two Dimensional Modelling in Urban and Rural Floodplains*.
- Froehlich, David C. (2008). Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. ASCE, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 12, December 2008, 1708-1721. ISSN 0733-9429.
- Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua. (2006). *Manual de Operación, Mantenimiento Y Auscultación* (p. 36) [Manual de Operación]. Tungurahua Ecuador: Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua.
- Hydrologic Engineering Center. (1980). *Flood Emergency Plans Guidelines for Corps Dams*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 609 Second Street, Davis, CA.
- Hydrologic Engineering Center. (2016). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 609 Second Street, Davis, CA.
- Hydrologic Engineering Center. (2018). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 609 Second Street, Davis, CA.
- Hydrologic Engineering Center. (2014). *Using HEC-RAS for Dam Break Studies*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 609 Second Street, Davis, CA.
- Instituto Geográfico Militar (2012). *Geoportal. Quito, Ecuador*. Recuperado de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>
- MacDonald, Thomas C., & Langridge-Monopolis, J. (1984). Breaching characteristics of dam failures. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 110, No. 5, May 1984, p. 567 -586. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:5\(567\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:5(567))
- Marejón, H. (1996) Análisis del riesgo de falla en presas, estadísticas y parámetros de referencia. *Ingeniería Hidráulica en México*, 11(2), 65-77.
- Marengo, H. (1996). Estadísticas y Parámetros De Referencia. *Ingeniería Hidráulica En Mexico*, Vol XI, Num 2, XI, 65-77. <http://www.revistatyc.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/762>

- Ministerio de Agricultura y Ganadería (2019). *Sistema de Información Pública Agropecuaria*. Quito, Ecuador. Recuperado de <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- Ministerio de Medio Ambiente (2001). *Guía Técnica para la elaboración de los Planes de Emergencia de Presas*. Secretaria de Estado de Aguas y Costas, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Madrid, España.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011). *Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*, p. 245, Madrid, España.
- Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá Colombia: TercerMundoEditores.
- Peng, M., & Zhang, L. (2012). Analysis of human risks due to dam-break floods-part 1: A new model based on Bayesian networks. *Natural Hazards*, 64(1), 903–933. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0275-5>
- Pilotti, M., Milanesi, L., Bacchi, V., Tomirotti, M., & Maranzoni, A. (2020). Research on Flood Propagation for Different Dam Failure Modes: A Case Study in Shenzhen, China. *Front. Earth Sci.* 8:527363. doi: 10.3389/feart.2020.527363
- Prestininzi, P. (2008). Suitability of the diffusive model for dam break simulation: Application to a CADAM experiment. *Journal of Hidrology*. 361(1), 172–185. DOI:10.1016/j.jhydrol.2008.07.050
- Rodríguez, L., Rodríguez, O., Marullo, C., & Barreto, W. (2015). Experiencias de modelación hidrodinámica de rotura de presas, mediante el uso de paquetes multidimensionales. *Ágora de Heterodoxias*, 1(2), 72–93.
- Sabat, I., Link, O., & Ettmer, B. (enero-febrero, 2015). Flujo inducido por el rompimiento de una presa: análisis mediante modelación numérica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 5-23.
- ShahiriParsa, A., Noori, M., Heydari, M., Rashidi, M. (2016). Floodplain Zoning Simulation by Using HEC-RAS and CCHE2DModels in the Sungai Maka River. *Air, Soil and Water Research*. 9:9 55–62 doi:10.4137/ASWR.S36089
- Soares-Frazão, S., Canelas., R., Cao, Z., Cea, L., Chaudhry, H., Die Moran, A., El Kadi, K., Ferreira, R., Fraga, I., Gonzalez, N., Greco, M., Huang, W., Imran, J., Le Coz, J., Marsooli, R., Paquier, A., Pender, G., Pontillo, M., Puertas, J., Spinewine, B., Swartenbroekx, C., Tsubaki, R., Villaret, C., Wu, W., Yue, Z., & Zech, Y. (2012) Dam-break flows over mobile beds: experiments and benchmark tests for numerical models, *Journal of Hydraulic Research*, 50:4, 364-375, DOI: 10.1080/00221686.2012.689682
- Toro, E.F. (2001). *Shock-capturing methods for free-surface shallow flows*. Wiley, Chichester, U.K.
- Tortajada, C. (2015) Dams: An Essential Component of Development, *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(1). DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000919
- Von Thun, J. Lawrence, & Gillette, D. R. (1990). *Guidance on breach parameters*. Unpublished internal document, U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Co. March 1990, 17 p.
- Wahl, T. (2014), *Evaluation of Erodibility-Based Embankment Dam Breach Equations*, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center Hydraulic Investigations and Laboratory Services Group Denver, Colorado.
- Wang, W., Chen, W., & Huang, G. (2020) Research on Flood Propagation for Different Dam Failure Modes: A Case Study in Shenzhen, China. *Front. Earth Sci.* 8:527363. doi: 10.3389/feart.2020.527363
- Xion, Y. (2011) A Dam Break Analysis Using HEC-RAS, *Jou Journal of Water Resource and Protection*, 3(6). Doi:10.4236/jwarp.2011.36047
- Xu, Y. & Zhang, L. M. (2009). Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 135, No. 12, p. 1957-1970, December 2009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000162](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000162)
- Yen, B. C., y W. H., Tang (1979). *Hydraulic and hydrology aspects of dam safety*. Proceedings Third ASCE Engineering Mechanics Division Speciality Conference. September.

BIOGRAFÍAS

Jorge Augusto Toapaxi Alvarez. Ingeniero Civil. Magister en Recursos Hídricos con mención en “Diseño de Proyectos Hidráulicos” de la Escuela Politécnica Nacional (EPN). Profesor e Investigador de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental (FICA), desde 2015. Ha desempeñado los cargos de: Jefe del Laboratorio Docente de

Hidráulica (2016-2019); Coordinador de la Maestría en Hidráulica (2018-2019); Director de Proyectos de Investigación en Mecánica Teórica - Computacional de Fluidos y Modelación Física de Fenómenos Hidráulicos, desde 2016. Actualmente, cursa sus estudios doctorales en Tecnología y Modelización en Ingeniería Civil, Minera y Ambiental en la Universidad Politécnica de Cartagena (España).



Andrés Manuel Acero Quilumbaquin. Ingeniero Civil Mención Hidráulica (2019) de la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente se desempeña como administrador de contratos en el Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Pichincha, de manera simultánea se encuentra desarrollando

proyectos de simulación numérica relacionados a la rotura de presas del Ecuador, con el objeto de clasificarlas en función del riesgo potencial.

Implementación del Modelo Pss2b en Simulink

García Hidalgo, Ernesto¹ ; Pérez Martínez, Maykop^{2,*} ; Rodríguez Domínguez, Yandry² 

¹Unión Eléctrica, Dirección técnica grupo de desarrollo. La Habana, Cuba.

²Centro de investigaciones y pruebas electroenergéticas, Universidad tecnológica de la Habana, Cuba.

Resumen: Este trabajo presenta un estudio de los diferentes tipos de estabilidad que están presentes en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) atendiendo su naturaleza física, tamaño de la perturbación y escala de tiempo, con énfasis en los fenómenos oscilatorios de pequeña señal. Con el fin de mejorar la estabilidad de pequeñas señales, se implementa el ajuste del estabilizador de potencia 2B propuesto por la IEEE, y que no está implementado en la herramienta, utilizando la herramienta Simulink de Matlab versión R2017a, se toman como esquema base el propuesto en Kundur (1993). El comportamiento que presenta el modelo mostrado ante una perturbación es comparado con modelos ya implementados en la herramienta, observándose un mejor comportamiento y confiabilidad.

Palabras clave: Estabilizador de Potencia, Estabilidad, Simulink, PSS.

Implementation of the Model Pss2b in Simulink

Abstract: In the present work, a study of the different types of stability that are present in Electrical Power Systems (SEP) was carried out, taking into account their physical nature, size of the disturbance and time scale, with emphasis on small-signal oscillatory phenomena. In order to improve the stability of small signals, the adjustment of the power stabilizer 2B, proposed by the IEEE, which is not implemented in the tool, is implemented using the Simulink tool of Matlab version R2017a, the one proposed in Kundur (1993). The behavior of the model presented before a disturbance is compared with models already implemented in the tool, observing a better behavior and reliability.

Keywords: Stabilizer of Power, Stability, Simulink, PSS.

1. INTRODUCCIÓN

Como afirman Kundur (1993) y Eufrazio (2016) en la actualidad la demanda de energía tiene un crecimiento exponencial, y debido a la necesidad de operar y de producir energía en los sistemas eléctricos de potencias (SEP) se ha incrementado el uso de la generación distribuida, principalmente de las energías renovables, teniendo como resultado que los sistemas eléctricos sean en la actualidad más mallados manejándose grandes bloques de energía por lo que necesario los estudios de estabilidad de voltaje.

En correspondencia con López (2004), los SEP muy cargados son propensos a problemas de la estabilidad de voltaje. Las causas de aparición del colapso de voltaje pueden ser originadas por varias razones, dentro de las cuales se encuentran principalmente: los ajustes de los sistemas de transmisión flexible en corriente alterna (FACTS), así como los sistemas de control de los generadores; régimen de operación del SEP; los límites de la generación para controlar el voltaje y la potencia reactiva y las características de la carga.

Uno de los fenómenos que más afecta a la estabilidad de los SEP, es la estabilidad ante pequeñas oscilaciones, la cual tiene un rango entre 0,1 a 3,0 Hz. Se plantea que estas oscilaciones se relacionan con los ajustes de los sistemas de control de los generadores, con interacciones entre estos o con la acción de la regulación secundaria de frecuencia.

Estas oscilaciones se pueden clasificar de acuerdo a su naturaleza física en oscilaciones mecánicas, electromecánicas locales e inter – área, torsionales y oscilaciones de control.

Para realizar los estudios de estabilidad mediante la simulación hay que tener en cuenta diferentes perturbaciones como son las variaciones en la carga, cortocircuitos que provoquen cambios en la transferencia de potencia de las líneas, cambios de velocidad en los rotores de los generadores, variación de los niveles de voltaje, cambios en la configuración del SEP o en sus parámetros de generación.

*maykop@electrica.cujae.edu.cu

Recibido: 31/10/2020

Aceptado: 06/07/2021

Publicado: 31/08/2021

10.33333/rp.vol48n1.06

CC 4.0

Para mejorar la estabilidad de pequeña señal, se instalan en el SEP los estabilizadores de potencias (PSS) donde su objetivo es mejorar el amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas para determinadas frecuencias en uno o más puntos de operación del sistema (Kundur, 1993; Gonzalez-Longatt, 2006), por lo que el objetivo del presente trabajo es implementar el estabilizador de potencia 2B, por sus siglas en inglés PSS2B, propuesto por la IEEE en el Simulink de Matlab, tomando, para su validación como esquema base el planteado en Kundur (1993).

Dada la importancia y la necesidad que se tiene de conocer el comportamiento de los equipamientos estabilizadores de potencia ante problemas de estabilidad surge este trabajo en el cual se revisaron diferentes bibliografías con el objetivo de asimilar los conocimientos y conceptos sobre estabilidad ante pequeñas oscilaciones, también se implementó el PSS-2B, propuesto por la IEEE, en la herramienta de Simulink, utilizándose como caso de estudio el sistema de dos aéreas presentado por Kundur (1993).

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Teniendo en cuenta a Kundur (1993) y Gonzalez-Longatt (2006) la estabilidad de un SEP es la propiedad de recuperar el estado de equilibrio en operación después de ocurrida una perturbación.

Ante una perturbación el SEP responde principalmente con variaciones en los ángulos de las máquinas generadoras, en los módulos de los voltajes de los nodos generadores y/o más cargados y oscilaciones en los flujos de potencia. Si la variación angular entre los generadores se mantiene entre los límites permisibles para el SEP, este mantiene el sincronismo, de lo contrario pierde el sincronismo, en la literatura consultada se plantea que este fenómeno se pone de manifiesto transcurridos 2 o 3 segundos desde la perturbación.

La estabilidad de un SEP puede ser clasificada como afirman Gonzalez-Longatt (2006) y Zea (2012) de acuerdo a su naturaleza física, tamaño de la perturbación y escala de tiempo. En la Figura 1 se muestra un resumen de la clasificación del problema de estabilidad en los SEP.

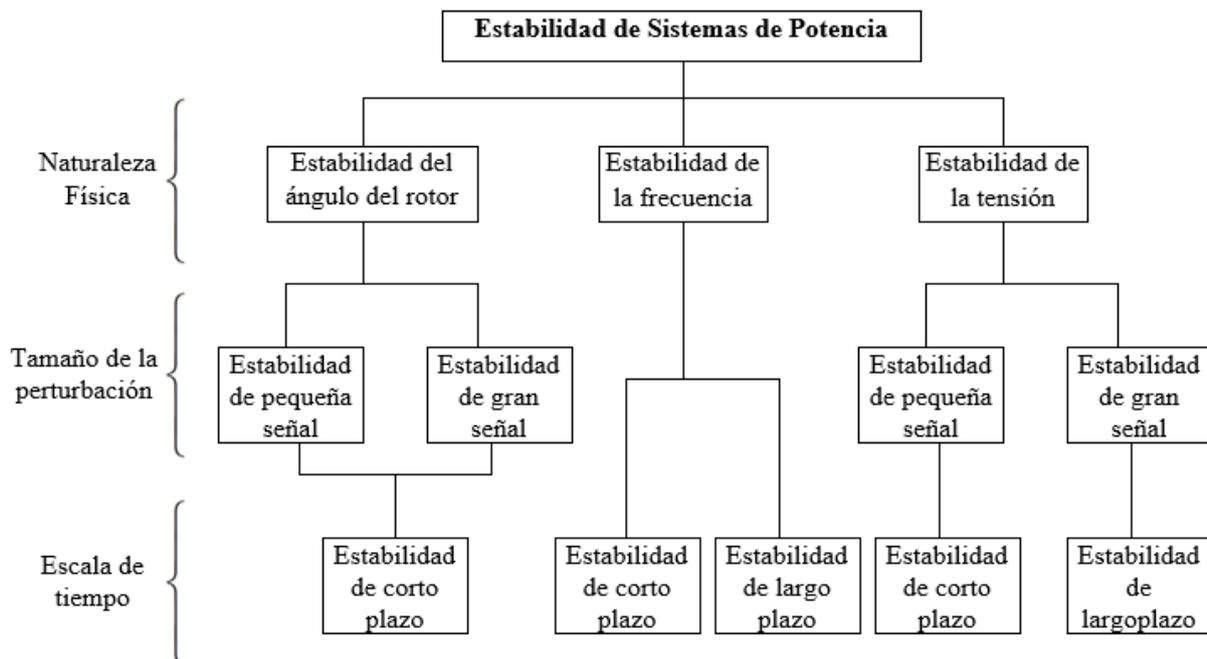


Figura 1. Clasificación de Estabilidad en Sistemas Eléctricos de Potencia. (Fuente: (Zea, 2012))

2.1 Estabilidad de pequeña señal

La estabilidad ante pequeñas perturbaciones o pequeña señal se define, teniendo en cuenta a Kundur (1993) y Zea (2012), como la propiedad de los generadores sincrónicos de mantenerse en sincronismo ante una pequeña perturbación y depende de la capacidad de mantener o recuperar el estado de equilibrio entre los torques electromagnéticos y los torques mecánicos de cada generador del SEP, en este contexto se consideran pequeñas perturbaciones a las pequeñas variaciones que ocurren en la carga y/o en la generación

La respuesta del SEP ante pequeñas señales, afirman Gonzalez-Longatt (2006) e Idárraga (2008), depende

principalmente del estado inicial de operación, de la fortaleza del sistema de transmisión, y las características del control de excitación de los generadores.

La estabilidad ante pequeñas señales se debe principalmente a la falta de amortiguamiento en las oscilaciones, las cuales pueden surgir debido a cambios en la topología y/o el punto de operación del SEP, estas pueden ser pequeñas, como ya se mencionó, como cambios constantes en la carga o grandes como una falla trifásica en una línea de transmisión por la cual circule una gran cantidad de potencia.

En los SEP, en correspondencia con Kundur (1993) las oscilaciones pueden clasificarse como:

- Oscilaciones normales o positivamente amortiguadas. Ocurren debido a eventos de rutina en los SEP, así, por ejemplo: para cambios de carga, salida de generadores y maniobras que pueden causar oscilaciones en el flujo de potencia, voltaje, corriente y frecuencia, el sistema no tiene problemas para reducir la amplitud de este tipo de oscilaciones.
- Oscilaciones sostenidas o no amortiguadas. Este tipo de oscilaciones se auto sustentan y no desaparecen sin una acción correctiva. Las oscilaciones sostenidas no son crecientes, pero tampoco tienden a reducirse. Este tipo de oscilaciones son dañinas en el sistema si tienen una amplitud suficientemente grande.
- Oscilaciones amortiguadas negativamente. Si una oscilación aparece y crece gradualmente en magnitud, es amortiguada negativamente. Este tipo de oscilación puede aparecer como oscilación normal o sostenida y crecer en tamaño hasta alcanzar una amplitud que los SEP no pueden asimilar por mucho tiempo.

Las oscilaciones debidas a las pequeñas señales, son ocasionadas constantemente, debido a los cambios de los ajustes en la generación, las variaciones de demanda, en los dispositivos de control, etc. Estas son de baja frecuencia y se pueden dividir en los siguientes tipos:

- Oscilaciones electromecánicas.
- Oscilaciones asociadas con los dispositivos de controles.
- Oscilaciones subsíncronas.

En SEP con un gran número de nodos, estas oscilaciones tienen naturaleza local o global, las cuales están asociadas a modos de oscilación del SEP, pudiendo definirse de acuerdo con Kundur (1993), Idárraga (2008) y Ardanuy (2003) como:

- Modos locales o modos de máquina-sistema: El término local es usado porque se deben a oscilaciones entre generadores de la misma planta o de plantas muy cercanas, o de un generador o una planta contra el resto del SEP. Pueden deberse también a los ajustes incorrectos en los modos de control, por ejemplo, los reguladores automáticos de voltaje de sistemas de excitación (AVR, por sus siglas en inglés) de grandes generadores y que están conectados al SEP a través de interconexiones débiles, líneas muy largas y radiales. El amortiguamiento de estas oscilaciones se logra con la conexión adicional al control de excitación de estabilizadores de potencia (PSS). Las frecuencias de estos modos de oscilación están en el rango de 0,7 a 2,0 Hz.
- Los modos inter-áreas: son las oscilaciones que ocurren entre un grupo de generadores de un área del SEP contra otro grupo de generadores de otra área cercana del SEP interconectadas por líneas cercanas a su capacidad estática de transmisión, es decir, conexiones débiles. Estos modos de oscilación se pueden presentar de dos maneras:
 - A frecuencias bajas involucrando todas máquinas generadoras del SEP, dividiendo a este en dos áreas, máquinas de un área

oscilando contra máquinas de la otra área. Las frecuencias de estos modos de oscilación están en el rango de 0,1 a 0,3 Hz.

- A frecuencias altas involucrando a subgrupos de máquinas generadoras del SEP, oscilando unas contra otras. Las frecuencias de estos modos de oscilación están en el rango de 0,4 a 0,7 Hz.

Se concluye entonces que la frecuencia de oscilación para este modo es de 0,1 a 0,7 Hz.

De acuerdo con Ardanuy (2003), la importancia de los conocimientos de la estabilidad de pequeñas señales, se debe a que:

- Son oscilaciones que afectan a todo SEP.
- Son difíciles de amortiguar (especialmente los inter-áreas).

Se debe aclarar que el término “estudio de estabilidad de pequeña señal” es utilizado de acuerdo con la literatura especializada que fue consultada, solo para referirse a la estabilidad de los modos locales e inter – áreas, los cuales involucran la estabilidad de las oscilaciones electromecánicas u oscilaciones de potencia.

López (2004) afirma que, para SEP cargados, con interconexiones a través de líneas de transmisión débiles y que sea evidente una estructura longitudinal, son expuestos a presentar oscilaciones de baja frecuencia.

Por su parte Idárraga (2008) y Martínez et al. (2015) plantean que una solución factible a este problema, son los PSS, los cuáles pueden ser ajustados, los modos locales, a través de un modelo preciso de una pequeña parte del SEP y simplificar el resto del sistema mediante modelos equivalentes. Mientras que para el estudio de los modos inter – áreas, por su complejidad, es necesario una representación detallada de todo el SEP.

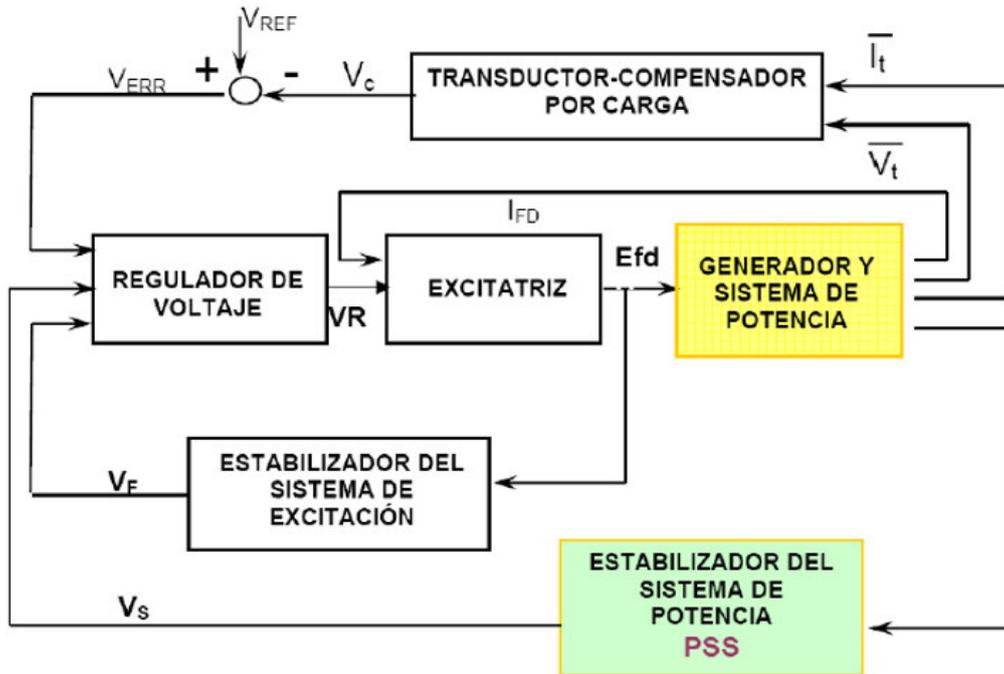
2.2 El PSS

Como señala Gallardo (2009) para un adecuado estudio de la interconexión de los SEP es necesario analizar las oscilaciones electromecánicas, pues éstas generalmente aumentan cuando se interconectan grandes SEP, mediante enlaces débiles y que además se intercambian grandes bloques de potencia, lo cual puede ocasionar la inestabilidad del sistema.

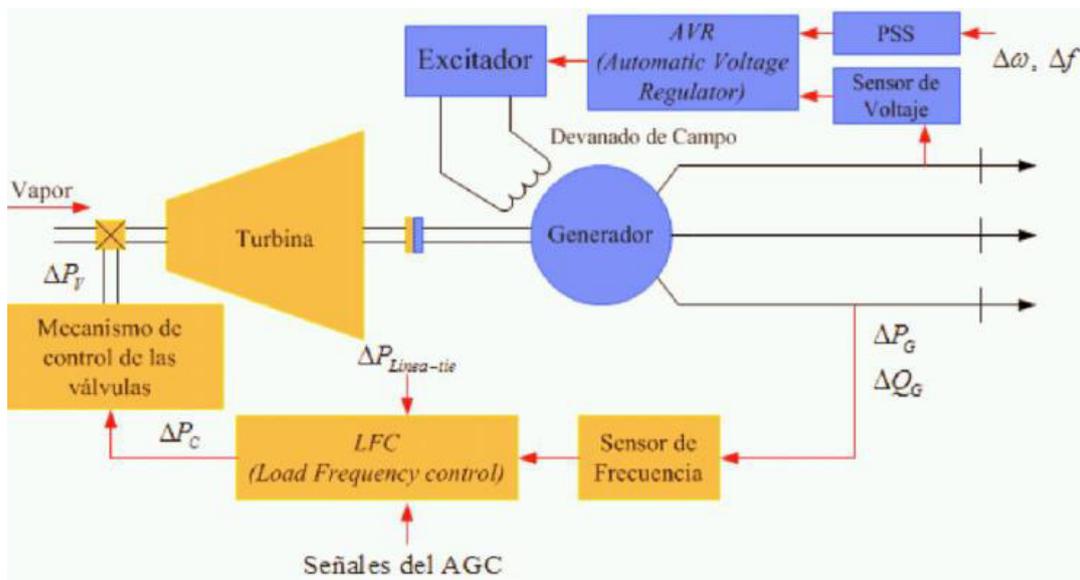
Para el buen funcionamiento del SEP todos los generadores deben mantener el sincronismo para garantizar de esta forma el valor constante de la frecuencia del voltaje de salida. El AVR es el dispositivo encargado de mantener constante el voltaje y la frecuencia generadas.

En estudios de interconexiones realizados han ocurrido inestabilidades en el sistema, observándose oscilaciones de baja frecuencia en el rango entre 0,1 a 3 Hz, las cuales restringen la capacidad de transmisión de potencia entre las máquinas generadoras y las cargas, es por esta razón que se diseñan los PSS, el cual es un elemento de control adicional sistema de excitación del generador, como se muestra en la

Figura 2, que permite amortiguar las oscilaciones y estabilizar los SEP. Por lo que, como afirman y Martínez et al. (2015) es necesario para amortiguar estas oscilaciones un buen ajuste del PSS.



a)



b)

Figura 2. Esquema a) Estabilizador de potencia. b) Esquema de AVR más PSS. (Fuente: (Sánchez, Pérez, & Castrillon, 2012))

Los PSS son dispositivos ampliamente usados para el amortiguamiento, no solo de las oscilaciones naturales, llamadas modo local de unidades de generación, sino de oscilaciones inter-planta e inter-área. Su objetivo es inyectar una señal adicional al regulador de voltaje (AVR) en fase con las desviaciones de velocidad y de esta forma generar un momento eléctrico amortiguante.

Sánchez et al. (2012) afirma que para que el PSS pueda producir esta señal, debe medir la desviación de velocidad, además de compensar los retardos existentes en el sistema de excitación y el campo del generador, con ajustes apropiados de las constantes de tiempo de dos o más filtros adelanto – atraso. En la Figura 3, se observa un diagrama general de la estructura de un PSS.

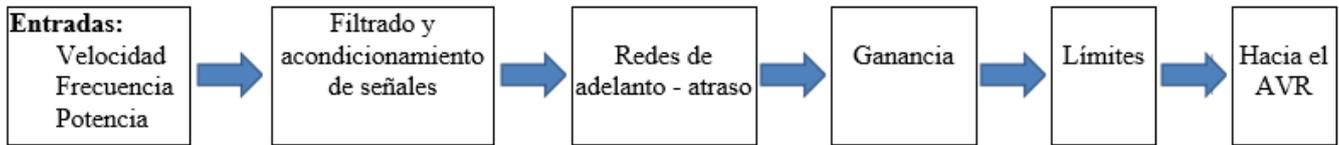


Figura 3. Diagrama general de la estructura de un PSS. (Fuente: (Sánchez, Pérez, & Castrillon, 2012))

Los PSS se clasifican de acuerdo a la señal de entrada, como: estabilizador delta-omega utiliza la velocidad del ángulo de rotor como señal de entrada; estabilizador delta-f usa la frecuencia eléctrica en la barra de conexión como señal de entrada; estabilizador delta-P usa la potencia como señal de entrada, y estabilizador delta P-omega es una combinación de los tipos a) y c).

Los primeros PSS medían las desviaciones de velocidad en el rotor para generar la señal estabilizante, sin embargo, este tipo de PSS es propenso a incrementar oscilaciones torsionales en unidades térmicas, por lo que se requiere la adición de un filtro torsional que adiciona un desfase a bajas frecuencias, que puede propiciar inestabilidad, lo que impide el uso de altas ganancias y por lo tanto su acción amortiguadora no es la deseada.

La frecuencia eléctrica, como entrada al PSS resulta en un mejor amortiguamiento de los modos de oscilación inter-área, ya que esta señal refleja mejor este tipo de oscilaciones. Este tipo de PSS resulta ideal para unidades conectadas a sistemas débiles. No obstante, no son muy sensibles para amortiguar modos locales. Adicionalmente, siguen requiriendo del uso de filtros torsionales en unidades térmicas, además de trasladar al voltaje del generador cualquier ruido en

la señal de frecuencia causada por ejemplo por cargas industriales o eventos transitorios en el sistema de potencia. Para eliminar las desventajas de los PSS con entrada de velocidad o frecuencia, se creó el PSS de potencia acelerante, el cual usa como entradas las señales de potencia generada y velocidad o frecuencia, para producir una señal proporcional a las variaciones de velocidad en el rotor, derivada de la potencia acelerante.

De acuerdo con Martínez et al. (2015), para ubicar en que generador o generadores debe estar el PSS se debe partir de un flujo de cargas del SEP en estudio para condiciones normales de operación, tomando este como régimen inicial, luego se incrementarán los voltajes a la entrada de los AVR en un 5 % para realizar corridas de flujo en el dominio del tiempo con el objetivo de observar las variaciones de velocidad en todos los generadores del SEP, siendo la mejor ubicación del PSS en o los generadores que se produzcan las mayores variaciones.

3. ANÁLISIS Y DICUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para la implementación del PSS 2B se tomó como caso estudio el sistema de dos aéreas presentado por Kundur (1993), mostrado en la Figura 4.

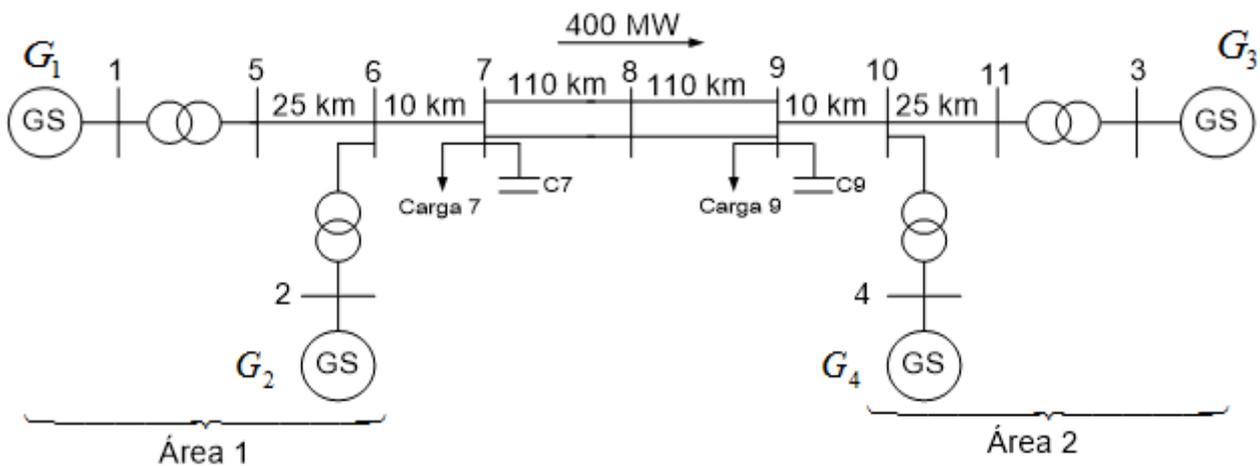


Figura 4. Sistema tomado como base. (Fuente: (Kundur P., 1993))

Este sistema está implementado en la herramienta SIMULINK/ MATLAB como se muestra en la Figura 5.

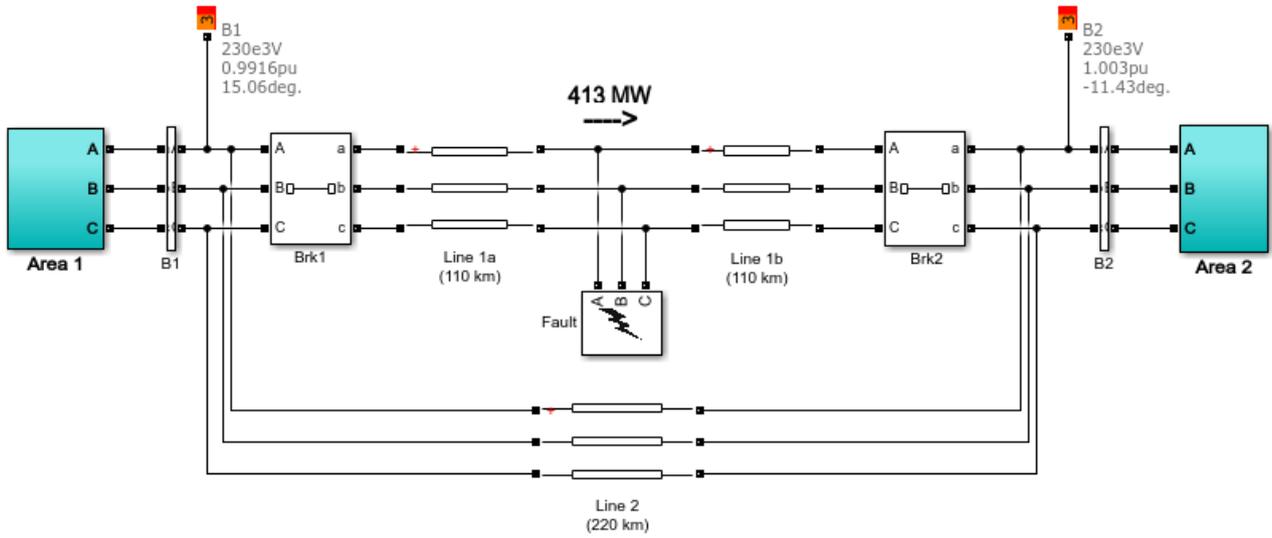
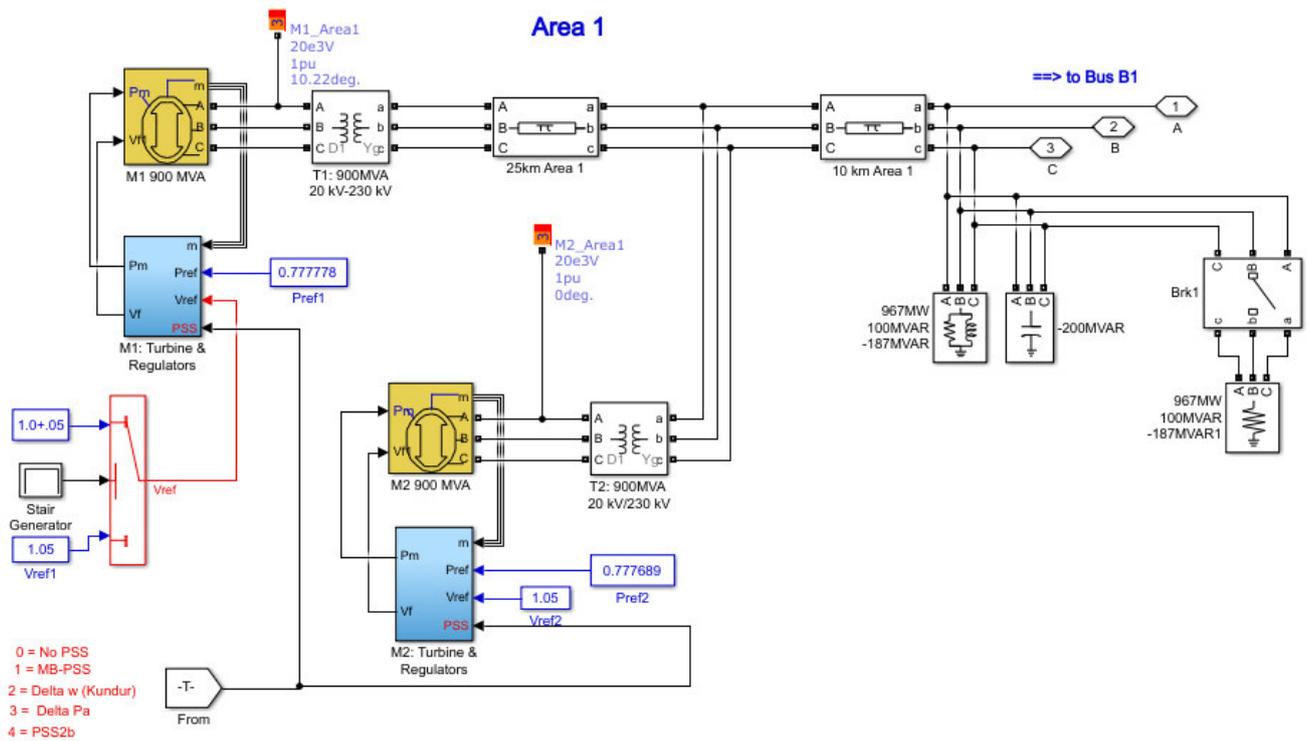


Figura 5. Modelo implementado en Simulink

Cada área está equipada con dos generadores idénticos de 20 kV / 900 MVA, como se aprecia en la Figura 6.



a)

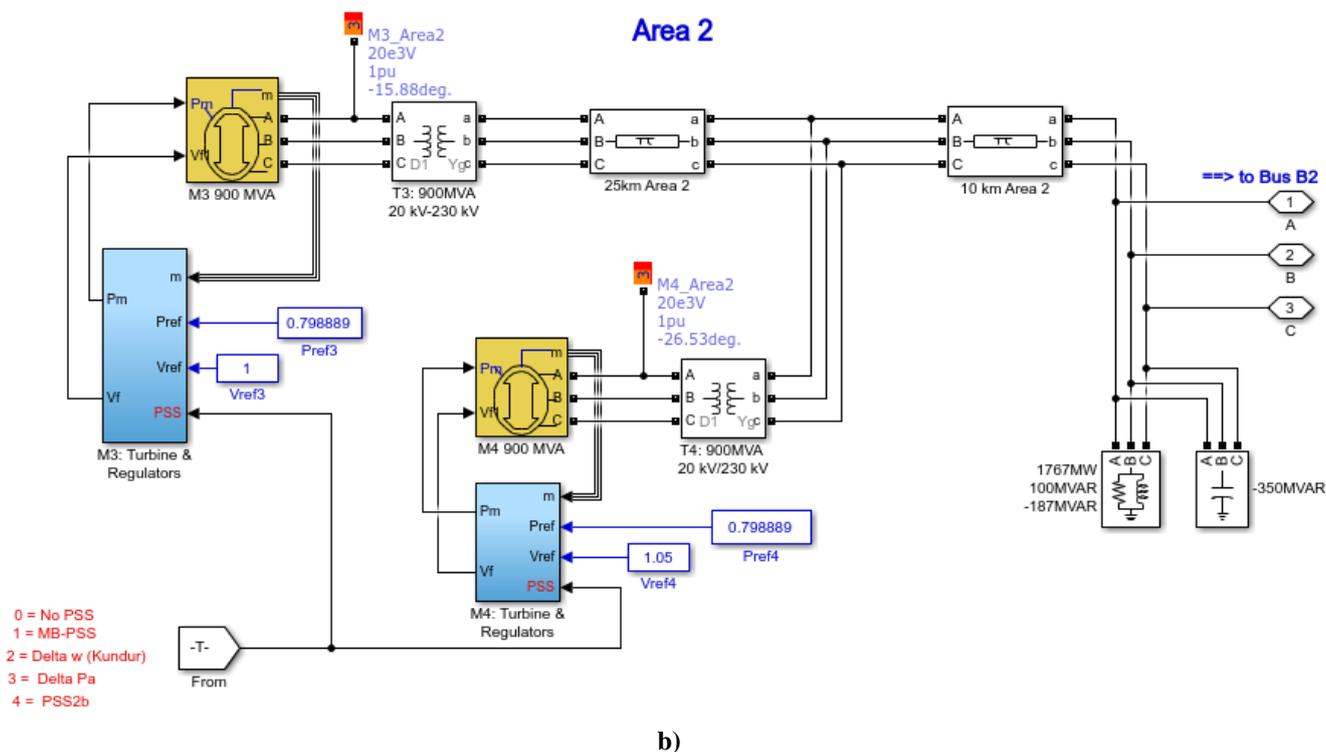


Figura 6. Modelo implementado en Simulink a) área 1 b) área 2

3.1 Descripción del sistema base

El sistema de prueba presenta dos áreas totalmente simétricas unidas entre sí por dos líneas de transmisión de 230 kV de 220 km de longitud. Fue diseñado en Kundur (1993) para realizar estudios de pequeñas señales en SEP grandes. A pesar de su pequeño tamaño, imita muy de cerca el comportamiento de los sistemas típicos en funcionamiento real. Cada área está equipada con dos generadores idénticos de 20 kV / 900 MVA, las máquinas síncronas tienen parámetros idénticos, a excepción de las inercias que son $H = 6,5$ en el área 1 y $H = 6,175$ en el área 2. También se suponen plantas térmicas con reguladores de velocidad idénticos en todas las ubicaciones, además de excitadores estáticos rápidos con una ganancia de 200. La carga se representa como impedancias constantes y se divide entre las áreas de tal manera que el área 1 está exportando 413 MW al área 2. Bajo estas condiciones el sistema está al límite de su estabilidad estática. El flujo de carga toma como nodo de balance (de referencia) la máquina 2 y se considera que todos los generadores producen alrededor de 700 MW cada uno. Además, las pérdidas de transmisión y generación pueden variar dependiendo del nivel de detalle con el cual se incorporen los datos de los elementos presentes en el SEP. En el esquema también está presente el bloque *Fault*, con el cual se puede establecer el tiempo, duración y tipo de cortocircuito.

En el esquema de Simulink, están implementadas para cada generador tres variantes PSS:

- MB-PSS o estabilizador de potencia multibanda: a diferencia de los estabilizadores de potencia o frecuencia convencionales, que tienen un solo filtro de retraso de avance para manejar todos los

fenómenos oscilatorios, el MB PSS tiene tres bandas de trabajo ajustables que proporcionan ajustes adecuados en todo el rango de frecuencias. Además de su diseño multibanda, el estabilizador el cual utiliza como señal de entrada la velocidad del rotor, que deriva de las lecturas de voltaje y corriente del terminal del generador.

- Delta ω PSS o estabilizador de potencia $\Delta\omega$: éste basa su funcionamiento en la constante medición de las variaciones de velocidad de los generadores, estas son enviadas al PSS, que entrega una señal de control al AVR. Esto se implementa mediante la inclusión de dispositivos de medición de la velocidad de rotación de las máquinas de generación y cuyos valores son luego enviados al PSS para ser procesados.
- Delta Pa PSS, su variable de medición es la potencia acelerante o diferencia de potencias entre la potencia mecánica y la potencia eléctrica del sistema de potencia.

Lo que se propone es implementar en el SEP tomado como caso estudio mostrado en Simulink, el modelo de PSS2B que toma como variables de control la potencia acelerante y la variación en la velocidad de la máquina, datos que son procesados por el PSS para enviar una señal de mando al AVR comprobándose el comportamiento del sistema ante contingencias y sus respuestas a los diferentes modos de oscilación, la Figura 7 muestra el diagrama de bloques del PSS IEEE 2B.

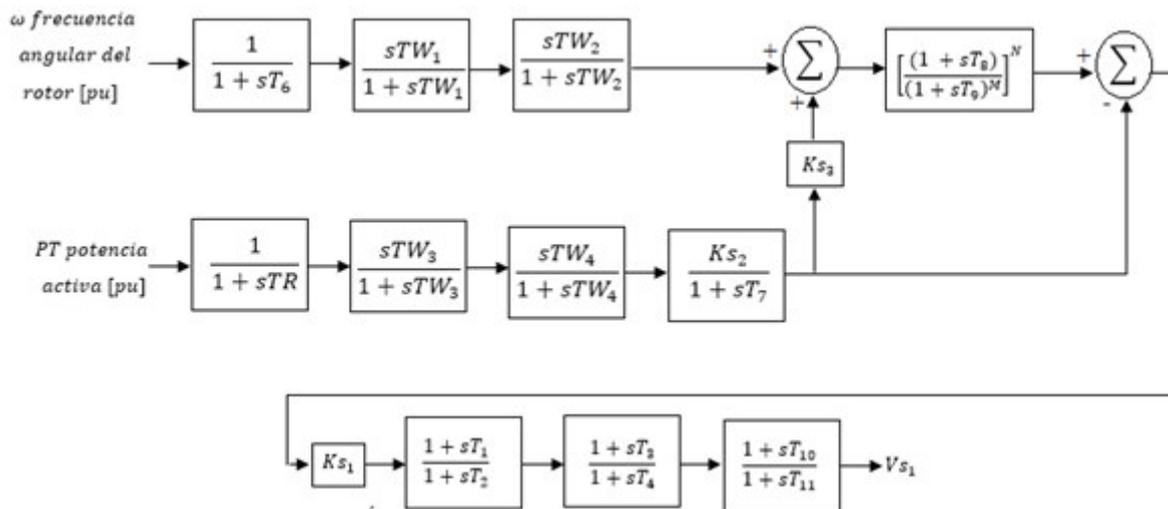


Figura 7. Diagrama de bloques del PSS2B según IEEE

Como afirma Sánchez et al. (2012) la entrada ω corresponde a la señal de desviación de frecuencia o velocidad, mientras la entrada PT está asociada a la señal de potencia activa generada. Las constantes TW_1 a TW_4 son filtros pasa alto, con el propósito de habilitar la acción del PSS cuando ocurran oscilaciones que deban ser amortiguadas, pueden ajustarse entre 1 y 20 segundos. La señal de potencia PT pasa a través de los filtros pasa alto (TW_3 y TW_4) para ser integrada, y producir la integral de la potencia eléctrica.

En Sánchez et al. (2012) citando a Bérubé & Hajagos (2007) se sugieren los siguientes criterios de ajuste para las funciones de transferencia de la potencia y frecuencia:

$$TW_3 = T_7; TW_4 = 0; K_{s2} = \frac{TW_1}{2H}; K_{s3} = 1.$$

Donde $2H = M$ es la inercia del grupo generador – turbina.

$$TW_1 = TW_2 = TW_3; T_6 \approx 0.$$

Las constantes de tiempo T_8 y T_9 , como los índices M y N , son seleccionados para conformar un filtro pasa bajo, llamado filtro rastreador de rampa, que tiene como objetivo atenuar componentes de alta frecuencia en la señal de entrada, minimizando el efecto en el voltaje del generador cuando se

presenten cambios rápidos en la potencia mecánica. En Bérubé & Hajagos (2007) se presentan los ajustes más usados para el filtro rastreador de rampa: $N = 1$; $M = 5$; $T_9 = 0,1$; $T_8 = M \cdot T_9 = 0,5$

Las constantes de tiempo T_1 , T_2 , T_3 y T_4 , componen los filtros de adelanto – atraso que son el corazón del PSS. Su función es compensar los retardos generados en el sistema de excitación, los transductores, filtros y el campo del generador. De esta forma, el PSS puede inyectar una señal en fase con las desviaciones de velocidad, y proporcionar el amortiguamiento deseado. Para generar amortiguamiento sobre un amplio rango de frecuencia y reducir los efectos indeseados sobre el voltaje generado, Sánchez et al. (2012) afirman que las constantes de tiempo deben fijarse de tal manera que este retardo sea menor de 90° para el mayor rango de frecuencia posible, y entre 0° y 45° desde la frecuencia más baja para el modo inter - área hasta la más alta del modo local.

La Figura 8 muestra el PSS2B implementado en Simulink y la Tabla 1 se muestran los valores estándares que se tomaron como ajustes en correspondencia con lo planteado por Martínez et al. (2015) y brindados por Jumbo (2012), Duarte-Mermoud & Milla (2018), Verdejo et al. (2015) y Delgado et al. (2017).

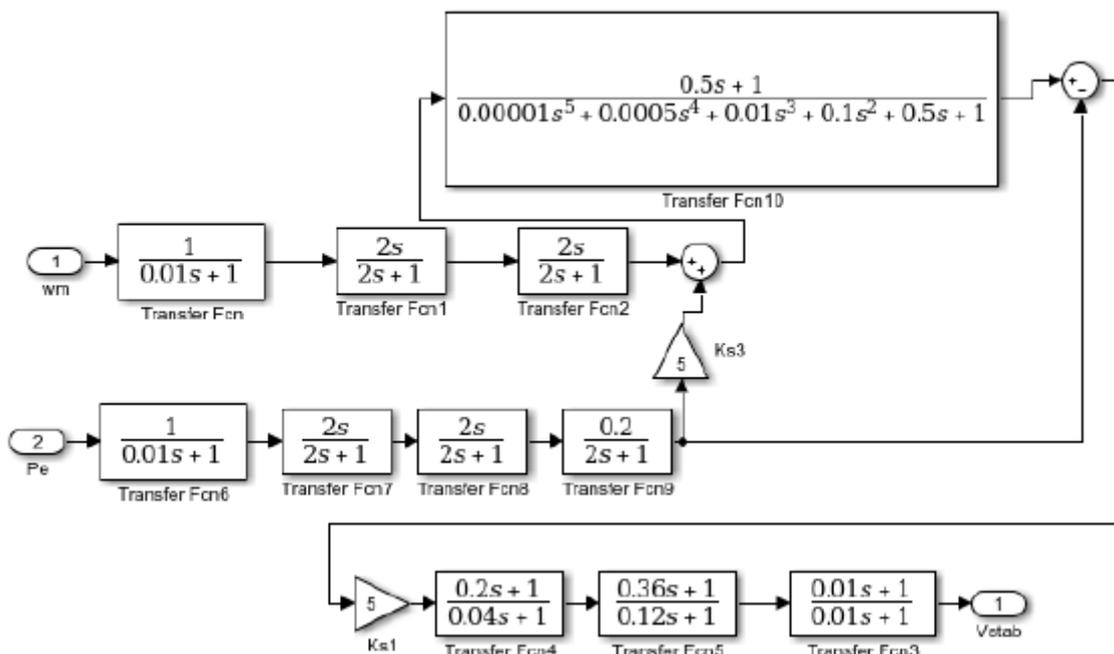


Figura 8. PSS2B implementado en Simulink

Tabla 1. Parámetros de ajuste del PSS2B

Parámetro	Descripción	Unidad	Valores estándar
TW_1, TW_2	Constantes de tiempo de limpieza.	s	2,0
TW_3, TW_4	Constantes de tiempo de limpieza.	s	2,0
KS_1	Factor de ganancia del PSS	pu	5,0
KS_2	Factor de compensación para el cálculo integral de la potencia eléctrica.	pu	0,2
KS_3	factor de coincidencia de señal.	pu	1,0
T_1, T_3, T_{10}	constantes de tiempo de entrega de la red acondicionada	s	0,2 0,36 0,01
T_2, T_4, T_{11}	constantes de tiempo de retardo de la red acondicionada	s	0,04 0,12 0,01
TR	Constante de tiempo activa del transductor de potencia	s	0,01

Tabla 1. Parámetros de ajuste del PSS2B

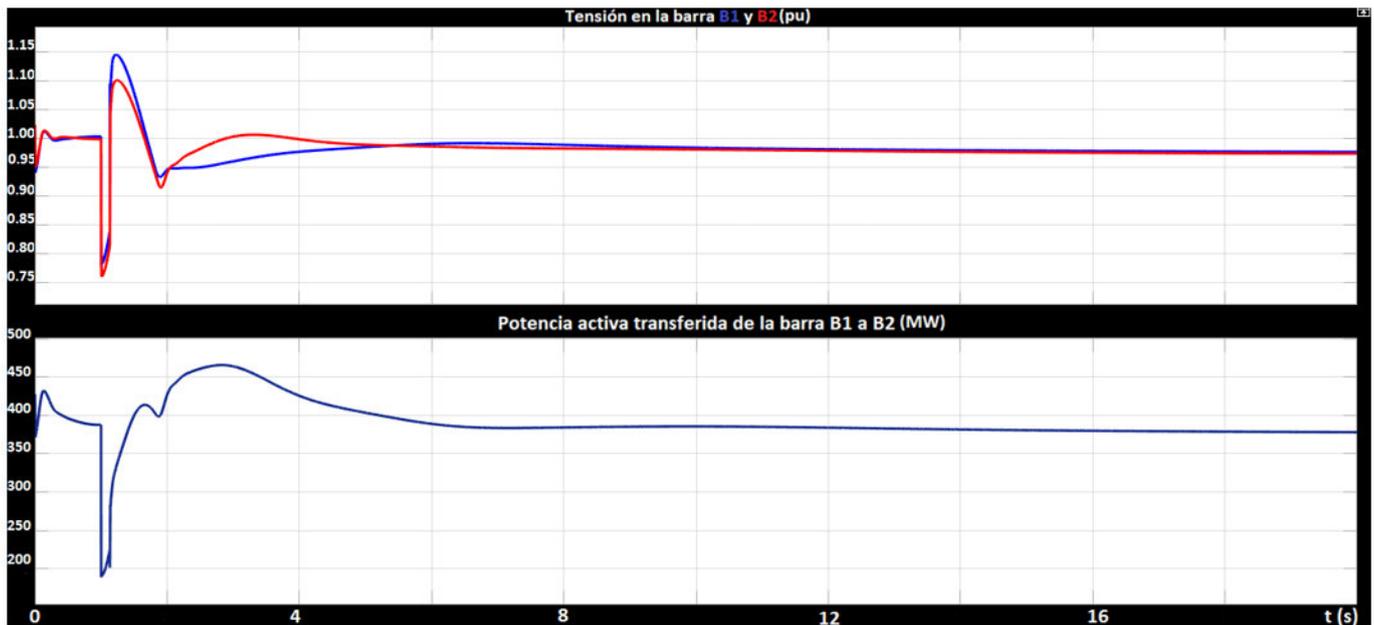
Parámetro	Descripción	Unidad	Valores estándar
T_6	desviación angular de frecuencia del rotor constante de tiempo del transductor	s	0,01
T_7	constante de tiempo para el cálculo integral de la potencia eléctrica	s	2,0
T_8	constante de tiempo de filtro de seguimiento de rampa	s	0,0
T_9	constante de tiempo de filtro de seguimiento de rampa	s	1,0
M	rampa de seguimiento filtro grado	-	5
N	rampa de seguimiento filtro grado	-	1

3.2 Comparación de los resultados.

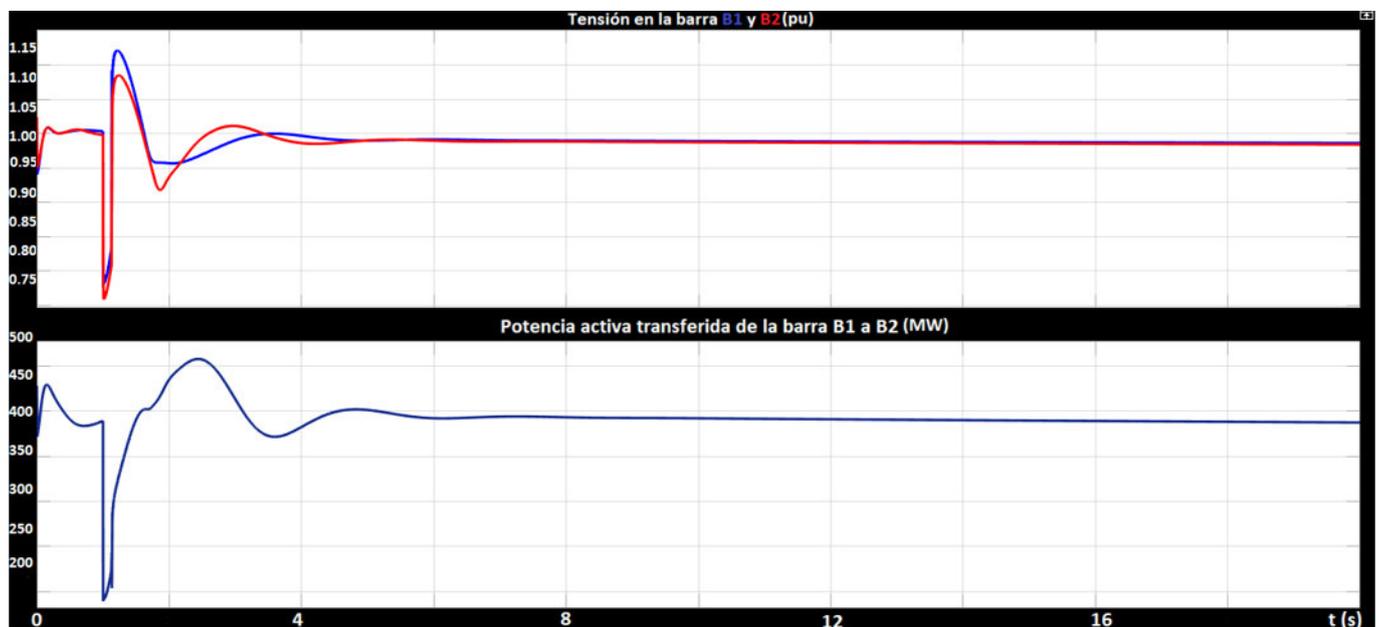
En el experimento se programa un cortocircuito trifásico que afecta a la red al segundo uno de la simulación, teniendo una duración de 8 ciclos. Tras la apertura de los interruptores en los extremos de la línea, se elimina el flujo de potencia por dicha línea y se crea un modo oscilatorio. Se partió, como caso 1, de la instalación de los PSSs en las cuatro máquinas con los mismos ajustes, pues así está implementado el ejemplo inicial en el Simulink de Matlab.

Como se puede observar en la Figura 9, el comportamiento del PSS2B con los ajustes realizados el sistema es estable, sobresaliendo ante el ΔPa -PSS que demora más en alcanzar un estado estable, más de 20 s, con gran oscilación de la potencia transferida.

Es de recordar que, en toda la literatura, como ya se mencionó anteriormente, no es recomendable la instalación de PSS en todas las máquinas del sistema por lo que se procedió a instalar PSS solo en el generador 4, ejemplo que se tomó como caso 2.



a)



b)

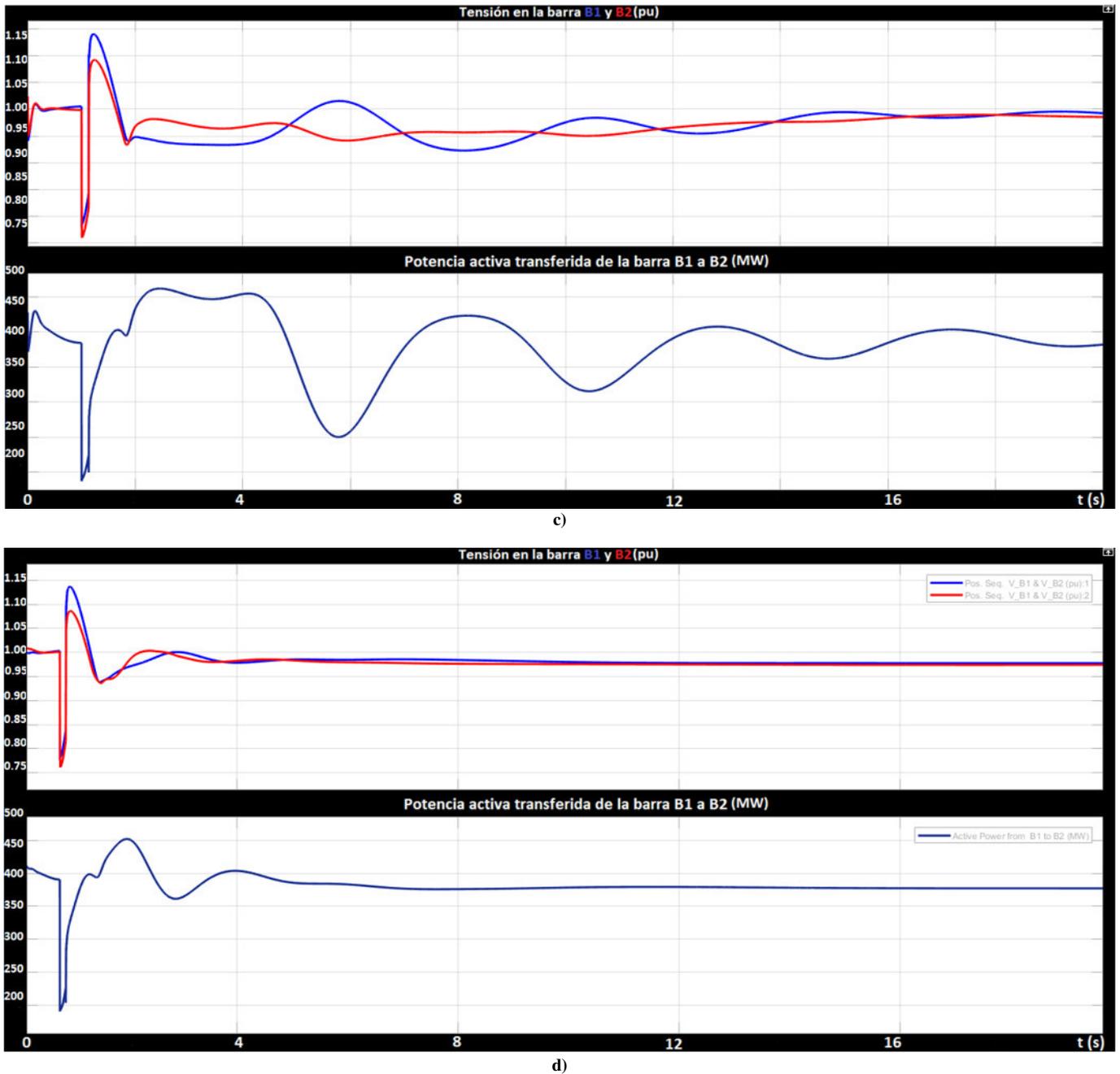


Figura 9. a) respuesta al cortocircuito del MB-PSS, b) respuesta al cortocircuito $\Delta\omega$ -PSS, c) respuesta al cortocircuito ΔPa -PSS, d) respuesta al cortocircuito PSS2B

Como se puede apreciar en la Figura 10, el MB-PSS no es capaz de amortiguar por sí solo el modo de oscilación que aparece luego del cortocircuito y su posterior aislamiento de la red. Comportamiento similar mostraron el ΔPa -PSS y $\Delta\omega$ -PSS. El PSS2B por el contrario es capaz de contrarrestar el efecto oscilatorio creado por la contingencia que aparece en el sistema, comportamiento esperado en todo momento.

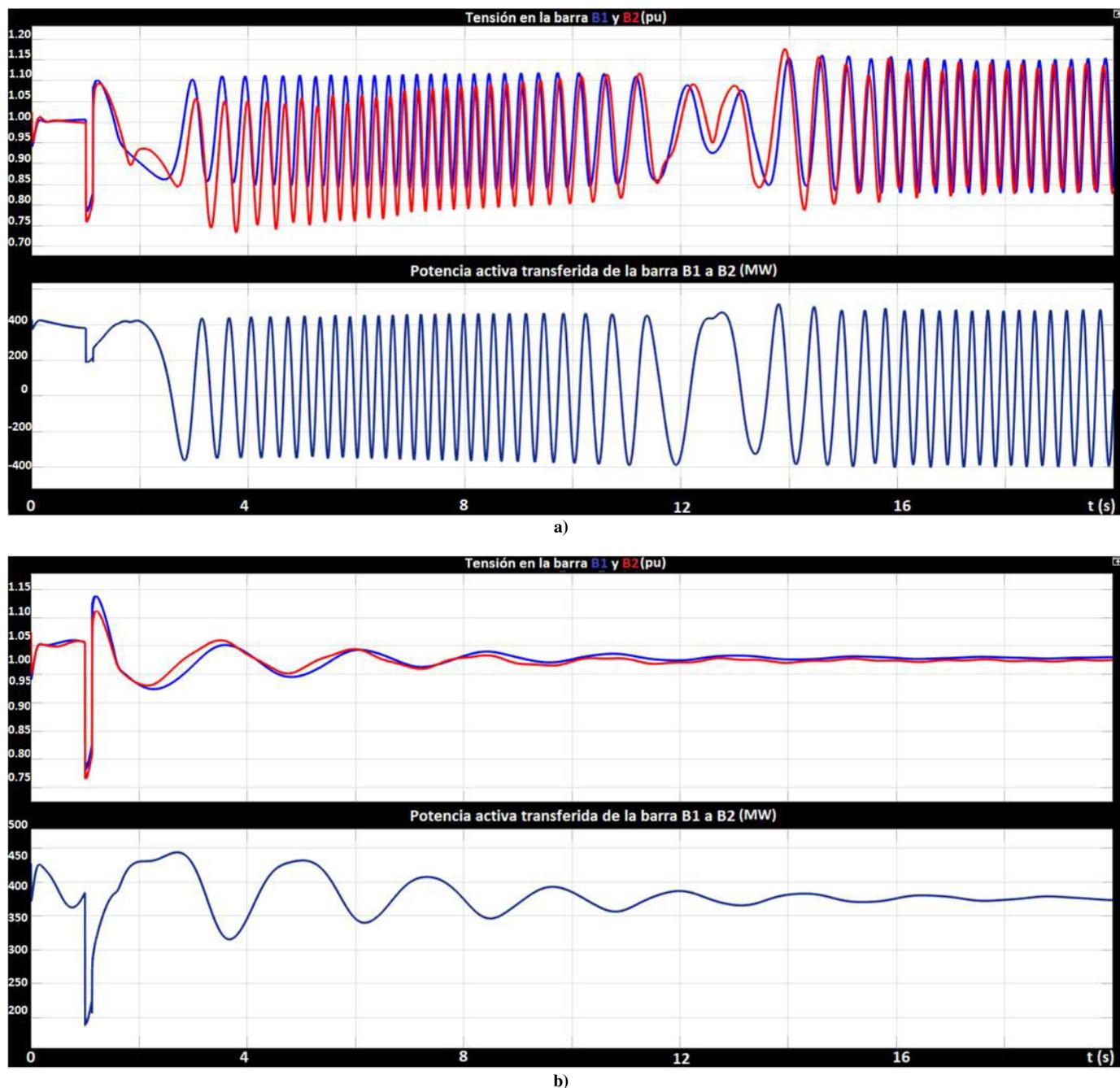


Figura 10. a) resultado de utilizar el MB-PSS solo en la máquina 4, b) Resultado de utilizar el PSS2B de la IEEE solo en la máquina

4. CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo se pudo comprobar la importancia de la instalación de PSSs para mejorar la estabilidad ante pequeñas perturbaciones de los SEP, por lo que se formulan las siguientes conclusiones.

- Se implementó el PSS2B de la IEEE usando la herramienta Simscape Power Systems de Matlab y se ajustó en correspondencia a las condiciones necesaria para mantener la estabilidad del sistema tomado como caso de estudio.
- Basándose en el análisis del caso 1, Figura 9, se puede observar que las variaciones de la potencia activa transferida y los voltajes en las barras 1 y 2 del sistema cuando están instalados solamente el PSS MB-PSS y el PSS2B son menores del 5% (ver

Figura 9 a) y d)), no ocurriendo así con el resto de los PSS instalados, por ejemplo, el ΔP_a -PSS, empieza a amortiguar las oscilaciones a partir de los 20 s (ver Figura 9 c)), en cuanto al $\Delta \omega$ -PSS, las diferencias de las amplitud de la variación del voltaje durante la contingencia oscilan en el orden del 6,6 % con respecto a los PSS MB-PSS y PSS2B, similar situación sucede con la transferencia de potencia activa siendo del 20 % aproximadamente, por lo que se tomó para el estudio del caso 2 la comparación del MB-PSS y el PSS2B.

- En el caso 2, Figura 10, puede constatar que con la instalación del MB-PSS, ante la ocurrencia de la contingencia, se pierde la estabilidad del sistema pues las oscilaciones tanto de voltaje

como de potencia activa transferida no se amortiguan, no sucediendo así con el PSS2B las cuales se amortiguan alrededor de los 12 s, por lo que la instalación de este PSS es la idónea.

REFERENCIAS

- Ardanuy, J. F. (2003). *Diseño de un estabilizador de sistemas de potencia neuro-borroso adaptativo ajustado mediante algoritmos genéticos*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones. Recuperado el Diciembre de 2016, de <http://oa.upm.es/42/1/09200302.pdf>.
- Bérubé, G., & Hajagos, L. (2007). Accelerating-Power Based Power System Stabilizers. *Kestrel Power Engineering Ltd. Mississauga, Ontario, Canada*. Recuperado el 2017, de https://kestrelpower.com/Docs/PSS_Tutorial_Chapter_Accelerating_Power_R2.pdf
- Casas, L. P. (1991). El estabilizador de potencia en amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas en sistemas eléctricos multimáquinas. *X Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica y Mecánica Eléctrica*. Recuperado el diciembre de 2016, de: <http://hрудnick.sitios.ing.uc.cl/paperspdf/estabil.pdf>.
- Delgado, F. R., Velásquez, S., Rosales, L., & Toledo, J. (2017). Modelado de estabilizador de potencia para análisis de pequeña señal utilizando paquete de simulación. *Universidad, Ciencia Y Tecnología*. Revista de la universidad nacional experimental politécnica "José Antonio de Sucre". 21(84), 119-125. Recuperado el 2019 de: <http://uct.unexpo.edu.ve/index.php/uct/article/download/802/646>
- Duarte-Mermoud, M. A., & Milla, F. (2018). Estabilizador de Sistemas de Potencia usando Control Predictivo basado en Modelo. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. Universitat Politècnica de València. 17(3), 286-297. doi: 10.4995/riai.2020.13304 Recuperado el 2019, de <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/10056/10191>
- Eufracio, N. M. (2016). *Mejora de la estabilidad transitoria en líneas de gran longitud mediante el uso de FACTS*. Tesis maestría. Universidad de Sevilla. Recuperado el marzo de 2018, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70786/>
- Gallardo, Q. C. (2009). *Estabilidad y Amortiguamiento de Oscilaciones en Sistemas Eléctricos con Alta Penetración Eólica*. Tesis doctoral. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática. Recuperado el 2017, de: <http://orff.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6731/CarlosGallardoTesisdoctoral.pdf?sequence=1>.
- García, A. M., Llanes, M. V., Breffe, O. T., & Martínez, M. P. (2015). Ajuste de Estabilizadores de Potencia en generadores utilizando el paquete Power Systems Analysis Toolbox PSAT. *XXXVI(1)*, 83-93. *La Habana: Ingeniería Energética*. Obtenido de <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/424/455>
- Gonzalez-Longatt, F. M. (2006). *Estabilidad en Sistemas de Potencia*. Recuperado el diciembre de 2016, de http://fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/SP_II/PPTCapitulo2SP2.pdf.
- Idárraga, V. M.; Parra, D. (2008). *Control de oscilaciones electromecánicas en sistemas eléctricos de potencia usando el análisis modal*. Tesis ingeniería. Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado el Diciembre de 2016, de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstr>
- Jumbo, Zhang; Chung, C.-Y.; Yingduo, Han. (2012). A novel modal decomposition control and its application to PSS design for damping interarea oscillations in power systems, *IEEE Transactions on Power Systems Vol. 27, No. 4*. 2015-2025. 10.1109/TPWRS.2012.2188820. Recuperado el 2017, de <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84868003093&origin=inward&txGid=d22617c60c151d1d7c595b48081128f8>
- Kundur, P. (1993). *Power systems stability and control*. s.l. : EPRI editors, Neal J. Balu & Mark G. Lauby.
- Kundur, P. e. (mayo de 2004). *Definition and Classification of Power System Stability*. Recuperado el diciembre de 2017, de <https://pdfs.semanticscholar.org/617a/0a813629f460915909840dc42330ce184718.pdf>.
- López, P. C.; Fernández, F.; Rauco, L.; Gonzáles, M; Rojo, J.; & Diogo, J. (2004). *Estabilidad de los sistemas eléctricos insulares*. Obtenido de https://www.icaei.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=259
- Martínez, G., Vilaragut, L., Torres, B., & Pérez, M. (2015). Ajustes de estabilizadores de potencia en generadores utilizando el paquete Power Systems Analysis Toolbox PSAT, *Ingeniería Energética Vol. XXXVI, No. 1*.
- Resquena-Pérez, R. (2013). *Diseño de un estabilizador de sistemas eléctricos de potencia adaptativo predictivo experto*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control. Recuperado el diciembre de 2016, de: <http://oa.upm.es/42/1/09200302.pdf>.
- Quingatuña, C. F. (2009). *Estabilidad y Amortiguamiento de Oscilaciones en Sistemas Eléctricos con Alta Penetración Eólica*. Tesis doctoral. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática. Recuperado el 2017, de: <http://orff.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6731/CarlosGallardoTesisdoctoral.pdf?sequence=1>.
- Sánchez, H. M., Pérez, A. J., & Castrillon, G. N. (2012). *Metodologías Heurísticas para ajuste de PSS*. *Jornadas técnicas ISA*. Obtenido de

<https://es.scribd.com/document/236943946/Metodologias-Heuristicas-Para-Ajuste-de-Pss>

Verdejo, H., Gonzalez, D., Delpiano, J., & Becker, C. (2015). Tuning of Power System Stabilizers using Multiobjective Optimization NSGA II. *IEEE Latin America Transactions*, 13(8):2653-2660. doi:10.1109/TLA.2015.7332145

Zea, A. Á. (2012). *Amortiguamiento de Oscilaciones de Muy Baja Frecuencia Usando PSS's Multibanda con Señales Globales*. Tesis ingeniería. Universidad Nacional de Colombia . Recuperado el Diciembre de 2016, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/5980/2/7108503.2012.pdf>.



Yandry Rodríguez Domínguez. Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica y Doctor en ciencias técnicas, Profesor asistente y Vicedecano Docente, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergética, CIPEL, Universidad Tecnológica de La Habana

José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba. Participó XIX Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba.

BIOGRAFÍAS



Ernesto García Hidalgo.

Ingeniero electricista, Especialista de Desarrollo en Redes y Sistemas en la Unión Eléctrica. Participó en la XIX Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba en su edición XVIII y XIX, 12^{do} Congreso Internacional de Educación Superior. Eléctrica, Cuba.



Maykop Pérez Martínez.

Ingeniero electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor auxiliar, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergética, CIPEL, Facultad de ingeniería eléctrica de la Universidad Tecnológica de la Habana, , Cuba. Jefe de

disciplina de Circuitos Eléctricos. Misión Internacionalista Republica de Angola, participó 2^{das} jornadas Técnicos – Científicas, Universidade Mandume Ya Ndemafuyo Escola Superior Politécnica do Namibe, XIX Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba, Universidad 2020 12^{do} congreso internacional de educación superior, XVIII convención y feria internacional informática 2020 y en el III Congreso virtual argentino e Iberoamericano de tecnología y educación – COVAITE 2020, Asociación de Pedagogos de Cuba, XII taller internacional “Maestro ante los retos del siglos XXI”, Congreso internacional Pedagogía 2021, IV taller de didáctica y aplicación de las ciencias básicas 2021 y VI taller internacional de formación básica y de postgrado en la universidad contemporánea.

Preparación de Artículos para la Revista Politécnica Utilizar Mayúsculas en cada Palabra en el Caso del Título

Apellido, Nombre¹; Apellido, Nombre²

¹Institución, Departamento o Facultad del Autor Principal, Ciudad, País

²Institución, Departamento o Facultad del Autor 2, Ciudad, País

Resumen: Las siguientes instrucciones establecen las pautas para la preparación de artículos para la Revista Politécnica. Los artículos pueden ser escritos en español o en inglés, pero tendrán un resumen de máximo 250 palabras en los dos idiomas. Los autores pueden hacer uso de este documento como una plantilla para componer su artículo si están utilizando Microsoft Word 2013 o superior. Caso contrario, este documento puede ser utilizado como una guía de instrucciones. El número mínimo de páginas será 6 y el máximo 15. Para el envío de los artículos, los autores deben seguir las instrucciones colocadas en el sistema de recepción de artículos del sitio web de la Revista Politécnica (revistapolitecnica.epn.edu.ec). En caso de que su artículo sea en inglés colocar el título y el resumen en los dos idiomas.

Palabras clave: Incluir una lista de 3 a 6 palabras.

Title of Manuscript

Abstract: These instructions give you guidelines for preparing papers for EPN Journal. Papers can be written in Spanish or English; however, an abstract of maximum 250 words and written in both languages is required. Use this document as a template to compose your paper if you are using Microsoft Word2013 or later. Otherwise, use this document as an instruction set. The minimum number of pages will be 6 and the maximum will be 15. For submission guidelines, follow instructions on paper submission system from the EPN Journal website(revistapolitecnica.epn.edu.ec).

Keywords: Include a list of 3 to 6 words.

1. SECCIÓN I

Este documento es una plantilla para versiones Microsoft Word 2013 o posteriores. Si está leyendo una versión impresa de este documento, por favor descargue el archivo electrónico, **revistapolitecnicaformato2020.docx**. En caso de que el autor desee enviar el artículo en formato LaTeX por favor comunicarse con la coordinación de edición (epnjournal@epn.edu.ec). *Por favor, no coloque numeración ni pie de página en el documento presentado.*

No cambie los tamaños de fuente o espaciado de renglones para ajustar el texto a un número limitado de páginas. Utilice cursiva o negrita para dar énfasis a un texto, no subrayado.

2. SECCIÓN II

Para las pautas de presentación, siga las instrucciones emitidas por el sistema del sitio web de la revista de la EPN.

La presentación inicial debe tomar en cuenta todas las indicaciones que se presentan en la plantilla, para de esta manera tener una buena estimación de la longitud del artículo

a publicarse. Además, de esta manera el esfuerzo necesario para la presentación final del manuscrito será mínimo.

Como sugerencia, es importante tomar en cuenta que, el primer autor es el investigador que hizo la mayor parte del trabajo, mientras que el último autor suele ser el profesor quien es el líder intelectual y, a menudo edita y presenta el borrador final del documento.

La Revista Politécnica pondrá en marcha un sistema de transferencia electrónica de derechos de autor en su momento. Por favor, "no" enviar formularios de derecho de autor por correo o fax. A continuación, se detallan las consideraciones que se deben tener en cuenta para la presentación final del artículo.

3. SECCIÓN III

3.1 Figuras, tablas y márgenes

Todas las figuras deben ser incorporadas en el documento. Al incluir la imagen, asegúrese de insertar la actual en lugar de un enlace a su equipo local. Los archivos de: figuras, dibujos, fotografías, etc., deberán enviarse en formato png, con al

menos 1200 puntos (resolución) en uno de sus ejes, con leyendas legibles y de tamaño adecuado. El artículo debe contener entre tablas y figuras un máximo de 10.

Las etiquetas de los ejes de las figuras son a menudo una fuente de confusión. Utilice las palabras en lugar de símbolos. Por ejemplo, escriba la cantidad "Magnetización," o "Magnetización M" no sólo "M".

Las figuras y tablas deben estar en la parte superior e inferior de las columnas. Evite colocarlas en medio de ellas. Las figuras y tablas grandes pueden extenderse a lo largo de ambas columnas. Las leyendas de las figuras deben estar centradas debajo de las figuras, los títulos de las tablas deben estar centrados sobre ellas. Evite colocar figuras y tablas antes de su primera mención en el texto. Para la mención de figuras, tablas o ecuaciones utilice las palabras completas con la primera letra en mayúscula, por ejemplo "Figura 1".

Coloque las unidades entre paréntesis. No etiquete los ejes sólo con unidades. Por ejemplo, escriba "Magnetización (A/m)" o "Magnetización (Am⁻¹)", no sólo "Magnetización A/m." No etiquete los ejes con una relación de cantidades y unidades. Por ejemplo, escriba "Temperatura (K)", no "Temperatura K".

Los multiplicadores pueden ser especialmente confusos. Escriba "Magnetización (kA/m)" o "Magnetización (103A/m)". No escriba "Magnetización (A/m) x 1000" porque el lector no sabrá si la etiqueta del eje de arriba significa 16000 A/m o 0,016 A/m. Las etiquetas de las figuras deben ser legibles, con un valor de 8 y sin espacio de separación con la figura.

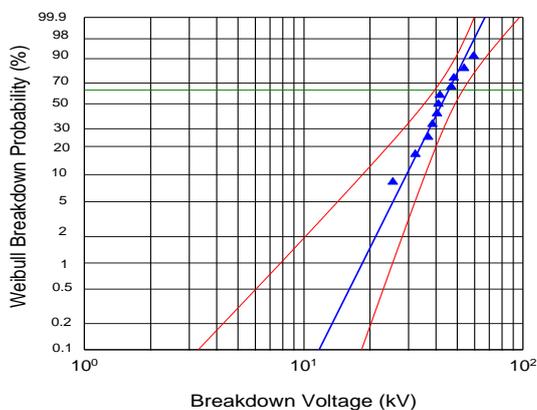


Figura 1. Distribución Weibull de 60 Hz voltajes de ruptura de cables $\alpha = 45,9$ kV $\text{pico}\beta = 5,08$. Intervalo de Confidencia 95%

Los autores deben trabajar activamente con los márgenes solicitados. Los documentos de la revista serán marcados con los datos del registro de la revista y paginados para su inclusión en la edición final. Si la sangría de los márgenes en su manuscrito no es correcta, se le pedirá que lo vuelva a presentar y esto, podría retrasar la preparación final durante el proceso de edición.

Por favor, no modificar los márgenes de esta plantilla. Si está creando un documento por su cuenta, considere los márgenes

que se enumeran en la Tabla 1. Todas las medidas están en **centímetros**.

Tabla 1. Márgenes de página

Página	Superior	Inferior	Izquierda/ Derecha
Primera	2,0	2,5	1,5
Resto	2,0	2,5	1,5

3.2 Ecuaciones

Si está usando MSWord, sugerimos utilizar el *Editor de ecuaciones de Microsoft* o el *MathType* add-on para las ecuaciones en su documento (*Insertar/Objeto/Crear Nuevo/Microsoft Ecuación o Ecuación MathType*). La opción "flotar sobre el texto" no se debe elegir.

Enumere las ecuaciones consecutivamente con los números de la ecuación en paréntesis contra el margen derecho, como en (1). Utilice el editor de ecuaciones para crear la ecuación y esta debe estar localizada en el margen derecho, como se muestra en el ejemplo siguiente:

$$\int_0^{r_2} F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma r_2 / (2\mu_0)] \quad (1)$$

Asegúrese de que los símbolos en su ecuación han sido definidos antes de que aparezcan en la ecuación o inmediatamente después. Ponga en cursiva los símbolos (T podría referirse a la temperatura, pero T es la unidad tesla). Para referirse a la ecuación se escribe por ejemplo "Ecuación (1)"

3.3 Unidades

Utilice el SI como unidades primarias. Otras unidades pueden ser utilizadas como unidades secundarias (en paréntesis). Por ejemplo, escriba "15 Gb/cm² (100 Gb/in²)". Evite combinar las unidades del SI y CGS, como la corriente en amperios y el campo magnético en oerstedios. Esto a menudo lleva a confusión porque las ecuaciones no cuadran dimensionalmente. Si tiene que usar unidades mixtas, aclare las unidades para cada cantidad en una ecuación.

Por ejemplo, en el SI la unidad de fuerza de campo magnético Hes A/m. Sin embargo, si desea utilizar unidades de T, o bien se refiere a la densidad de flujo magnético B o la fuerza del campo magnético simbolizadas como $\mu_0 H$. Use un punto en el centro para separar las unidades compuestas, por ejemplo, "A·m²".

3.4 Abreviaturas y Siglas

Defina las abreviaciones y acrónimos la primera vez que se utilizan en el texto, incluso después de que ya han sido definidos en el resumen. No utilice abreviaturas en el título a menos que sea inevitable.

3.5 Otras recomendaciones

- Para expresar valores decimales se usarán comas, por ejemplo 3,45. Use un cero antes del decimal.

- Se incluirá un espacio entre números para indicar los valores de miles, por ejemplo 463 690.
- Utilice notación científica para expresar números con más de 3 cifras hacia la derecha o izquierda, es decir, mayores a 2,50E+05 o menores a 4,8E-03.
- Finalmente, de ser necesario y de manera opcional, se pueden incluir conclusiones, recomendaciones y agradecimiento.

REFERENCIAS

La lista de **referencias debe estar en Formato APA ordenada alfabéticamente** de acuerdo con el apellido del primer autor del artículo. El agregado et al no debe ir en cursiva. Por favor nótese que todas las referencias listadas aquí deben estar directamente citadas en el cuerpo del texto usando (Apellido, año). Las notas al pie deben evitarse en la medida de lo posible.

El artículo debe contener un mínimo de 6 referencias.

Seguir el formato indicado a continuación de acuerdo al tipo de referencia a:

Formato básico para referenciar libros:

Apellido, Inicial Nombre. (Año). *Título del libro*. Ciudad, País: Editorial.

- **Libros con un autor:**

En las referencias:

King, M. (2000). *Wrestling with the angel: A life of Janet Frame*. Auckland, New Zealand: Viking.

Cita en el texto:

(King, 2000) o King (2000) argumenta que ...

- **Libros con dos autores:**

En las referencias:

Treviño, L. K., y Nelson, K. A. (2007). *Managing business ethics: Straight talk about how to do it right*. Hoboken, NJ: Wiley

Cita en el texto:

(Treviño y Nelson, 2007) o Treviño y Nelson (2007) ilustran...

- **Libros con dos o más autores:**

En las referencias:

Krause, K.-L., Bochner, S., y Duchesne, S. (2006). *Educational psychology for learning and teaching* (2nd ed.). South Melbourne, VIC., Australia: Thomson.

Cita en el texto:

De acuerdo con Mezey et al. (2002) o ... (Mezey et al., 2002).

Formato básico para referenciar artículos científicos

Apellido, Inicial Nombre. (Año). Título del Artículo. *Título/Iniciales de la Revista*. Número de Volumen (Tomo), páginas

- **Artículos en revistas:**

En las referencias:

Sainaghi, R. (2008). Strategic position and performance of winter destinations. *TourismReview*, 63(4), 40-57.

Cita en el texto:

(Sainaghi, 2008) o Sainaghi (2008) sugiere ...

- **Artículos con DOI**

En las referencias:

Shepherd, R., Barnett, J., Cooper, H., Coyle, A., Moran, J., Senior, V., & Walton, C. (2007). Towards an understanding of British public attitudes concerning human cloning. *Social Science & Medicine*, 65(2), 377-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.socscimed.2007.03.018>

Cita en el texto:

Shepherd et al. (2007) o Shepherd et al. (2007) resaltan la...

- **Artículos sin DOI**

En las referencias:

Harrison, B., & Papa, R. (2005). The development of an indigenous knowledge program in a New Zealand Maori-language immersion school. *Anthropology and Education Quarterly*, 36(1), 57-72. Obtenido de la base de datos Academic Research Library

Cita en el texto:

(Harrison y Papa, 2005) o En su investigación, Harrison y Papa (2005) establecieron...

- **Artículos en línea**

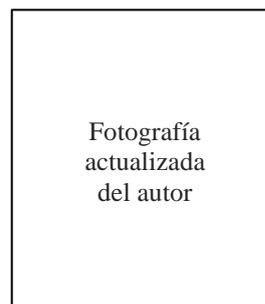
En las referencias:

Snell, D., & Hodgetts, D. (n.d.). The psychology of heavy metal communities and white supremacy. *Te Kura Kete Aronui*, 1. Obtenido de: <http://www.waikato.ac.nz/wfass/tkka>. (Mayo, 2015).

Cita en el texto:

(Snell y Hodgetts, n.d.) o Snell y Hodgetts (n.d.) identificaron "..."

BIOGRAFÍA



Mini biografía del primer autor con un máximo de 100 palabras.

Fotografía
actualizada
del autor

Mini biografía del segundo
autor con un máximo de 100
palabras.

INDEXACIONES



Matriz de Información para el
Análisis de Revistas



REVISTA
POLITÉCNICA



revistapolitecnica.epn.edu.ec



INDEX  COPERNICUS
I N T E R N A T I O N A L



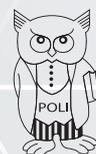
revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



REVISTA
POLITÉCNICA



EPN
editorial

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec