

**Algoritmo de detección y alerta temprana para el monitoreo y registro de eventos asociados  
a la regulación primaria de frecuencia en sistemas de generación de energía eléctrica  
dentro del contexto regulatorio colombiano**

José Guillermo García Herrera

Asesor

Javier Enrique Arévalo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD  
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería ECBTI  
Especialización en Redes de Nueva Generación

2024

## Resumen

La regulación de frecuencia primaria en plantas de generación hidráulica, térmica y fotovoltaica es un elemento crítico para mantener la estabilidad de la red eléctrica. La integración de fuentes de energía renovables, como la fotovoltaica, ha introducido desafíos adicionales en la gestión de frecuencia. Para abordar estos desafíos se han desarrollado herramientas digitales, sistemas SCADA y estrategias de programación avanzadas.

Las referencias mencionadas proporcionan información valiosa sobre cómo se monitorean y controlan las centrales de generación eléctricas utilizando estas tecnologías. Además, se destacan estrategias para la detección temprana de eventos de frecuencia anormal y la generación de alertas. Estos sistemas permiten a los operadores de plantas de generación y centros de control anticiparse y responder eficazmente a los cambios de frecuencia, evitando así posibles interrupciones en el suministro eléctrico, tomar decisiones acertadas en la posibilidad de diagnóstico eficiente y reajustes a los dispositivos de respuesta en eventos de frecuencia pertinentes.

La integración de las energías renovables, en particular la fotovoltaica, ha aumentado la necesidad de una regulación de frecuencia más sofisticada. Los sistemas SCADA y las herramientas digitales permiten monitorear en tiempo real la generación y el consumo de energía, facilitando la detección temprana de desviaciones de la frecuencia nominal. Estas desviaciones pueden deberse a la variabilidad intrínseca de las fuentes de energía renovables, como la radiación solar, o a acontecimientos imprevistos, como fallos de equipos.

Para garantizar la estabilidad de la red eléctrica, es fundamental que las plantas de generación y los sistemas de control estén equipados con sistemas eficaces de alarma y aviso. Estos sistemas notifican a los operadores sobre eventos de frecuencia anormal y les permiten

tomar medidas correctivas de manera oportuna. La anticipación y la respuesta rápida son fundamentales para evitar interrupciones en el suministro de energía y garantizar la calidad del servicio eléctrico.

En resumen, la regulación primaria de frecuencia en plantas de generación hidráulica, térmica y fotovoltaica, con detección mediante herramientas digitales, SCADA y desarrollos de programación aplicados a centros de control con el uso de redes de nueva generación y sistemas de telecontrol, es un tema crítico en la gestión del sector eléctrico y las redes. La implementación eficaz de sistemas de alarma y aviso es esencial para garantizar la estabilidad y fiabilidad del suministro energético en un entorno en constante evolución, impulsado por la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

El área de estudio del presente problema está enfocada en la ingeniería de gestión, monitoreo y control operativo de sistemas basados en redes de comunicación, sistemas SCADA, telecontrol y la seguridad de las redes informáticas, de telecomunicaciones y de desarrollo tecnológico, con el fin de atacar de manera acertada y metódica una realidad actual en la cual se manejan grandes cantidades de datos y sistemas complejos en masa.

Los sistemas industriales, de producción y de transacciones digitales como resultado de la digitalización global de los procesos en general y economía mundial, específicamente enfocándose el estudio en proponer y establecer estándares mediante herramientas de desarrollo digital con aplicativos eficientes y de conexión en línea para la detección de eventos de este tipo y de aplicación tecnológica con monitoreo en tiempo real en los centros de control, centros de generación y distribución de energías eléctrica así como aquellos sistemas de telecontrol que están conectados y son transversales a la operación de los equipos que los controlan.

***Palabras claves:*** Regulación de Frecuencia Primaria (RPF), Algoritmo de detección de eventos, Redes Eléctricas Interconectadas (REI), Sistemas de Telecontrol, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), Centro de control de generación de energía, Frecuencia eléctrica, Umbrales de Frecuencia, Redundancia, Modelado y Simulación, Interoperabilidad.

## Abstract

Primary frequency regulation in hydro, thermal and photovoltaic generation plants is a critical element to maintain the stability of the electrical grid. The integration of renewable energy sources, such as photovoltaics, has introduced additional challenges in frequency management. Digital tools, SCADA systems and advanced scheduling strategies have been developed to address these challenges.

The references mentioned provide valuable information on how power generation plants are monitored and controlled using these technologies. In addition, strategies for early detection of abnormal frequency events and the generation of alerts are highlighted. These systems allow power plant operators and control centers to anticipate and respond effectively to frequency changes, thus avoiding possible interruptions in the electrical supply, making sound decisions in the possibility of efficient diagnosis and readjustments to response devices in relevant frequency events.

The integration of renewable energies, particularly photovoltaics, has increased the need for more sophisticated frequency regulation. SCADA systems and digital tools enable real-time monitoring of energy generation and consumption, facilitating early detection of deviations from the nominal frequency. These deviations may be due to the intrinsic variability of renewable energy sources, such as solar radiation, or to unforeseen events, such as equipment failures.

To ensure the stability of the electrical grid, it is essential that generation plants and control systems are equipped with effective alarm and warning systems. These systems notify operators of abnormal frequency events and allow them to take corrective measures in a timely manner. Anticipation and rapid response are essential to avoid interruptions in the supply of energy and to ensure the quality of the electrical service.

In summary, primary frequency regulation in hydroelectric, thermal and photovoltaic generation plants, with detection by digital tools, SCADA and programming developments applied to control centers with the use of new generation networks and remote control systems, is a critical issue in the management of the electrical sector and networks. The effective implementation of alarm and warning systems is essential to ensure the stability and reliability of energy supply in a constantly evolving environment, driven by the transition to cleaner and more sustainable energy sources.

The area of study of this problem is focused on the engineering of management, monitoring and operational control of systems based on communication networks, SCADA systems, remote control and the security of computer networks, telecommunications and technological development, in order to attack in an accurate and methodical way a current reality in which large amounts of data and complex systems are handled en masse.

Industrial, production and digital transaction systems as a result of the global digitalization of processes in general and the world economy, specifically focusing the study on proposing and establishing standards through digital development tools with efficient applications and online connection for the detection of events of this type and technological application with real-time monitoring in control centers, centers of generation and distribution of electric energy as well as those remote control systems that are connected and are transversal to the operation of the equipment that controls them.

**Keywords:** Primary Frequency Regulation (PFR), Event detection algorithm, Interconnected Electrical Networks (IEN), Telecontrol Systems, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), Power generation control center, Electric frequency, Frequency thresholds, Redundancy, Modeling and Simulation, Interoperability.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	12
Base Bibliográfica del Proyecto.....	13
Justificación .....	15
Objetivos.....	16
Objetivo General .....	16
Objetivos Específicos.....	16
Definición del Problema .....	17
Beneficios.....	19
Desventajas .....	20
La Idea para la Investigación Aplicada.....	25
Marco Referencial.....	26
Estado del Arte.....	26
Marco Conceptual.....	31
Centros de Monitoreo o Centros de Control .....	31
Automatización en la Generación de Energía Eléctrica.....	32
Redes de Transmisión Eléctrica .....	33
PLC en la Industria.....	34
Delimitación del Estudio.....	35
Objetivo Específico 1 .....	35
Objetivo Específico 2 .....	35
Objetivo Específico 3 .....	36
Bases de Estudio .....	39

Resultados y Entregables de Objetivos Específicos .....	42
Objetivo Específico 1 .....	42
Objetivo Específico 2 .....	43
Objetivo Específico 3 .....	49
Conclusiones .....	63
Referencias .....	64

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Ficha de Caracterización Resultado Algoritmo</i> .....	57
<b>Tabla 2</b> <i>Relación de Intereses Investigativos, Líneas y Grupos de Investigación</i> .....	57
<b>Tabla 3</b> <i>Identificación Estructura de Investigación</i> .....	58
<b>Tabla 4</b> <i>Cronograma de Actividades para el Diseño e Implementación de la Solución</i> .....	60
<b>Tabla 5</b> <i>Recursos o Presupuesto Para Solución e Implementación</i> .....	61

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Árbol Causa Efecto del Problema</i> .....	19
<b>Figura 2</b> <i>Conexión a Servidor Local SCADA PI</i> .....	43
<b>Figura 3</b> <i>Conexión a SCADA PI y Parámetros</i> .....	43
<b>Figura 4</b> <i>Conexión a Servidor Externo XM Reportes Eventos</i> .....	44
<b>Figura 5</b> <i>Código de Proceso Desarrollado en Python</i> .....	44
<b>Figura 6</b> <i>Proceso de Programación</i> .....	45
<b>Figura 7</b> <i>Análisis de Datos Enlazados</i> .....	45
<b>Figura 8</b> <i>Parametrización y Clasificación</i> .....	46
<b>Figura 9</b> <i>Evaluación de Parámetros</i> .....	46
<b>Figura 10</b> <i>Graficación de Modelos</i> .....	47
<b>Figura 11</b> <i>Resultados Ordenados</i> .....	47
<b>Figura 12</b> <i>Reporte Inicial de Modelos de Frecuencia, Conexión a Servidores y Telegram</i> .....	48
<b>Figura 13</b> <i>Flujo Power Automate, RPF a Bot Telegram</i> .....	48
<b>Figura 14</b> <i>Proceso de Ejecución en Entorno Virtual</i> .....	49
<b>Figura 15</b> <i>Validación de Datos Suministrados</i> .....	50
<b>Figura 16</b> <i>Finalización del Proceso y Envío de Correo</i> .....	50
<b>Figura 17</b> <i>Generador Oriental 1</i> .....	51
<b>Figura 18</b> <i>Generador Térmico 1</i> .....	52
<b>Figura 19</b> <i>Generador Rio Bogotá</i> .....	53
<b>Figura 20</b> <i>Generador Huila 1</i> .....	54
<b>Figura 21</b> <i>Huila Hidro 1</i> .....	55
<b>Figura 22</b> <i>Parque Solar 1</i> .....	56

**Figura 23** *Diagrama de Flujo Proceso de Validación Evento RPF* ..... 59

## **Introducción**

La regulación de frecuencia primaria es un componente crucial en la gestión de la red eléctrica. Garantiza la estabilidad de frecuencia en el suministro de energía, lo cual es esencial para el funcionamiento confiable de los sistemas de energía. En los últimos años, la convergencia de las redes de nueva generación (NGN) y los sistemas de telecontrol ha promovido el desarrollo de algoritmos y aplicaciones de detección avanzados para mejorar la regulación primaria de frecuencia y su alerta temprana en la detección de eventos. Este se centra en implementar aplicaciones y algoritmos de detección en la regulación primaria con el objetivo de evidenciar fallos y poder realizar ajustes a tiempo evitando fallos en la red e impactos económicos para los entes generadores.

En Colombia, la CREG (Comisión Reguladora de Energía y Gas) ha establecido regulaciones detalladas, como las resoluciones CREG 023 y CREG 025, para supervisar y asegurar el cumplimiento de los agentes generadores en la prestación de este servicio crítico.

Hoy en día, la tecnología se ha convertido en una parte fundamental de nuestras vidas. Las redes de telecomunicaciones, la energía eléctrica y la tecnología digital, son el medio principal para conectar personas, dispositivos y servicios. De esta manera se pretende implementar el desarrollo con el objetivo de priorizar y diversificar los sistemas hacia su aplicación eficiente aportando sostenibilidad, optimización y solución a necesidades.

### **Base Bibliográfica del Proyecto**

A continuación, presentaré un resumen de los aspectos más destacados de la literatura consultada, enfocándome específicamente en el tema relevante de RPF (regulación primaria de frecuencia y eventos de frecuencia en Sistemas eléctricos de interconexión mediante aplicativos digitales y conexión por redes NGN).

Para comprender completamente la regulación de frecuencia primaria en las centrales eléctricas y su monitoreo mediante herramientas digitales y sistemas de control avanzados, fue necesario disponer de una variedad de fuentes.

De acuerdo a Jizhong Zhu (2016), establece en “Integración de Fuentes de Energía Renovables y Tecnologías de Redes Inteligentes: Operación de Microrredes y Sistemas de Distribución”. Este libro proporciona una visión general de la integración de fuentes de energía renovables, incluida la fotovoltaica, en la red eléctrica. Aborda la regulación de frecuencia primaria en plantas de energía y cómo se utilizan las herramientas digitales y los sistemas SCADA para controlar y monitorear la generación de energía. También se destacan estrategias para la detección temprana de eventos de frecuencia anormal y las alertas correspondientes, (Jizhong Zhu 2016).

Según Ali Abur y Antonio Gómez Expósito, (2004), en la “Estimación del estado del sistema eléctrico: teoría e implementación”. Se centra en las técnicas de estimación del estado del sistema eléctrico, un componente clave de los sistemas SCADA utilizados en las plantas de energía. Aborda cómo se monitoriza y regula la frecuencia en tiempo real y cómo se generan alarmas y alertas en caso de desviaciones significativas de la frecuencia nominal (párr. 7).

Con el análisis realizado del sistema eléctrico el libro, "Análisis del sistema eléctrico moderno" proporciona una descripción general de los sistemas de control de energía en plantas

de energía, incluidos los sistemas de generación térmica e hidroeléctrica. Se exploran los conceptos de regulación de frecuencia primaria y cómo se implementan estrategias de alarma y alerta en eventos de frecuencia anormales (D.P. Kothari y I.J. Nagrat, 2002).

Se plantea en el texto de, "Integración de Energías Renovables: Gestión Práctica de la Variabilidad, Incertidumbre y Flexibilidad en las Redes Eléctricas". La integración de la energía renovable en la red eléctrica y cómo esto afecta la regulación de frecuencia. También aborda las soluciones tecnológicas y de programación utilizadas para controlar y monitorear las centrales eléctricas, incluidas las fotovoltaicas, y cómo se manejan las alarmas y alertas ante situaciones de eventos de frecuencia anormal (Lawrence E. Jones, 2014).

El libro de "SCADA: Supervisión, Control y Adquisición de Datos", se centra en los sistemas SCADA, que son esenciales para el seguimiento y control de las plantas de generación. Aborda cómo se implementan las alarmas y alertas en estos sistemas y cómo contribuyen a la regulación primaria de frecuencia en diferentes tipos de plantas, incluidas las hidráulicas, térmicas y fotovoltaicas (Stuart A. Boyer, 2013).

## **Justificación**

Esta investigación es de gran importancia ya que aborda un aspecto fundamental en la gestión de los sistemas eléctricos. La implementación de aplicaciones y algoritmos de detección en la regulación de frecuencia primaria puede mejorar significativamente la estabilidad de la red y reducir los riesgos asociados con las fluctuaciones de frecuencia. Además, el cumplimiento de las normas establecidas por la CREG es fundamental para garantizar la seguridad y confiabilidad del suministro eléctrico en Colombia. La convergencia de las NGN y los sistemas de telecontrol es una tendencia que no se puede pasar por alto, ya que ofrece importantes ventajas en términos de seguimiento y control en tiempo real de los sistemas eléctricos.

La evaluación del cumplimiento de la normatividad existente y la identificación de desafíos y áreas de mejora permitirán implementar acciones correctivas y preventivas, con el fin de fortalecer la confiabilidad del sistema eléctrico colombiano y promover una mayor eficiencia en el suministro de la energía y la prestación óptima del servicio de regulación primaria de frecuencia. El algoritmo que aquí se pretende implementar, verifica si los eventos de regulación primaria cumplen con los parámetros de tiempo de respuesta, aporte en la respuesta de potencia y contribución del aporte sostenido.

Para lograr esto se utiliza un enfoque simple de procesamiento de señales que busca contribuir al conocimiento y mejora continua de la regulación primaria de frecuencia en Colombia, promoviendo un sistema eléctrico confiable, estable y de calidad en beneficio de los usuarios y la sociedad en general.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Desarrollar un algoritmo de alerta temprana mediante lenguaje PYTHON y Redes de Nueva Generación que permita el monitoreo y registro de los eventos de regulación primaria de frecuencia por parte de las entidades generadoras en Colombia de acuerdo con la normativa CREG vigente y los mecanismos establecidos por XM.

### **Objetivos Específicos**

Definir las variables que deben ser monitoreadas por el algoritmo de alerta temprana para la supervisión de la regulación primaria de frecuencia con base en una revisión de la normativa colombiana.

Proponer un algoritmo que permita la toma de decisiones relacionadas a la regulación primaria de frecuencia en unidades de generación, a través de soluciones basadas en Redes de Nueva Generación y sistemas de telecontrol.

Validar el algoritmo propuesto con base en datos históricos y simulaciones de eventos de regulación primaria para su aplicación en diferentes generadores del sistema interconectado nacional.

## **Definición del Problema**

La modernización de los centros de control y monitoreo en la generación de energía, abarca una necesidad importante, ya que estos centros para el sector representan los activos primarios del propósito del negocio y una responsabilidad en la eficiencia del sistema de interconexión nacional y la prestación del servicio de energía para cumplir con la demanda que a cada día crece, en las ideas de innovación de estos centros se refleja que en la industria de la energía cada día hay un avance tecnológico que conlleva cambios en la forma y procesos en cómo se genera y de este modo como se controlan dichos procesos de modo tal que estos sean más dinámicos, y económicamente sostenibles en todas sus áreas.

A nivel global esa tendencia a la automatización, telecontrol y supervisión mediante centros de control central y monitoreo e ideología de SmartWork, se consolida con la interacción hombre- máquina y se lleva a la realidad desarrollando sistemas inteligentes desde las telecomunicaciones la electrónica básica, la potencia en sistemas eléctricos, permitiendo promover a un nivel tecnológico con herramientas como el internet de las cosas IoT, mecanismos de sensamiento y control constante, permitiendo crear procesos más proactivos y asequibles a la industria por medio de los sistemas de comunicación, control y estandarización, basados en la premisa de eficiencia, mejora continua y centros de control, “Control Room” que permitan evaluar, referenciar, predecir e identificar, fallas, oportunidades y correctivos en el negocio de la energía eléctrica y su producción en plantas de generación, en vista de las nuevas energías limpias y renovables desde un solo lugar y tener el control de todos los activos de la generación en general así como el cumplimiento regulatorio de los mismos.

De esto modo, es necesario implementar un algoritmo que permita obtener una alerta temprana de las centrales de generación de diversas tecnologías, arraigada al cumplimiento

regulatorio y que permita verificar preventivamente el cumplimiento de regulación primaria ante eventos de frecuencia de gran impacto en el sistema eléctrico nacional. Asociado a otros factores digitales, señales de SCADA y conexión en línea contar con herramientas útiles y aplicativos eficientes que permitan un diagnóstico favorable preliminar para que mediante este un equipo técnico específico pueda atender y verificar los ajustes en las centrales pertinentes que se deban llevar a cabo.

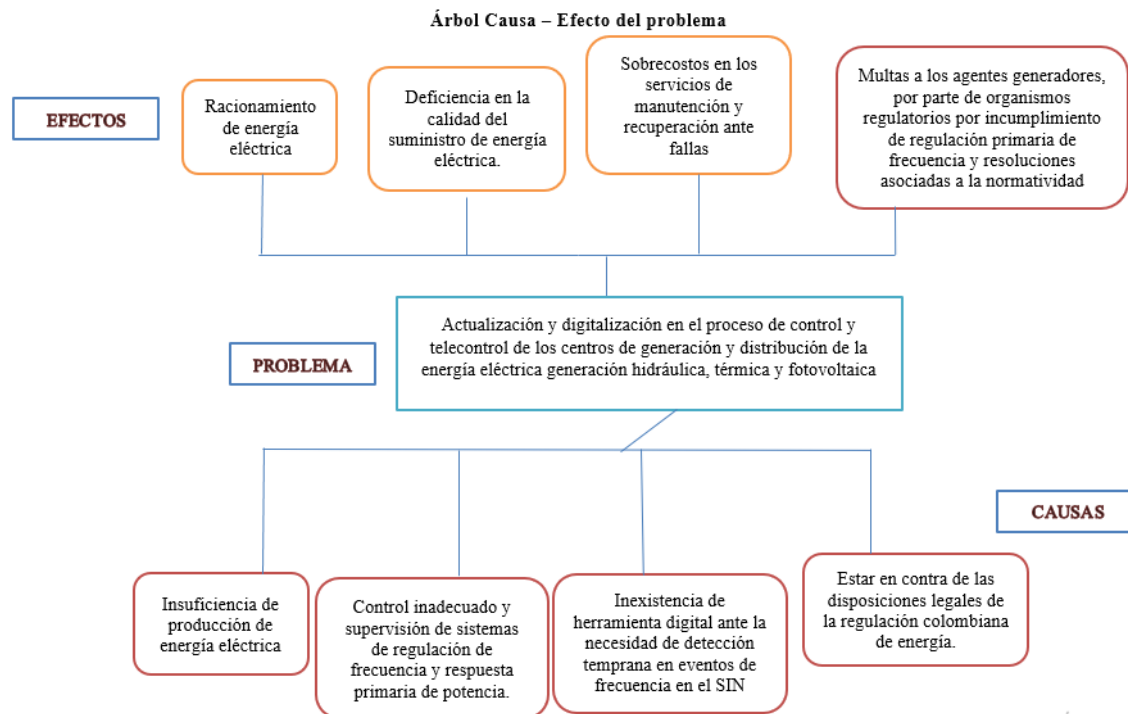
Los mercados de energía liberalizados están estructurados de tal manera que, se garantice la separación de las diferentes tareas dentro de la cadena de valor de energía (evitando la aparición de monopolios) para una conformación de precios eficiente.

Los mercados energéticos liberalizados se refieren a sistemas en los que la generación y venta de energía eléctrica están abiertas a la competencia y a la participación de múltiples actores. Este enfoque busca promover la eficiencia y la innovación en el sector energético.

Algunos críticos sostienen que la liberalización puede llevar a la concentración del mercado en manos de unos pocos actores, lo que podría resultar en precios más altos para los consumidores.

Además, la liberalización puede plantear desafíos en términos de seguridad energética y sostenibilidad.

Si bien la liberalización puede fomentar la competencia y la eficiencia, es crucial implementar regulaciones efectivas para evitar la concentración del mercado y garantizar la protección del consumidor. Además, se deben considerar cuidadosamente los impactos en la seguridad energética y la transición a fuentes de energía más sostenibles.

**Figura 1***Árbol Causa Efecto del Problema***Beneficios**

En el artículo (Liberalización de los Mercados Eléctricos: Factores, Beneficios, Retos y Dificultades, se tiene que “Eficiencia y competencia, la liberalización fomenta la competencia entre diferentes generadores y comercializadores de energía, lo que puede conducir a precios más bajos para los consumidores y una mejor gestión de la oferta y la demanda” (Centro de Educación Virtual (puce.edu.ec)», 2018).

“Innovación, la presión competitiva en los mercados liberalizados puede alentar a las empresas a invertir en nuevas tecnologías y mejorar la eficiencia” (El Proceso de Liberalización de los Sectores Energéticos, s. f.)

Sostenibilidad, la liberalización puede promover la adopción de fuentes de energía renovables y la reducción de las emisiones de carbono (<https://energy5.com/es/el-impacto-de-la-desregulacion-en-los-mercados-electricos>., s.f.).

Elección de fuentes de energía, la liberalización permite a los consumidores elegir su fuente de energía preferida, lo que puede contribuir a la diversificación de las fuentes de energía y reducir la dependencia de un único proveedor (Ventajas-e-Inconvenientes-de-la-Liberalizacion-del-Mercado-Energetico-de-la-UE, s.f.)

### **Desventajas**

Desequilibrios del mercado, la liberalización puede generar desequilibrios en el mercado, como la sobreexplotación de la infraestructura o la manipulación de precios, que pueden afectar la estabilidad y la calidad del suministro de energía. (Ventajas-e-Inconvenientes-de-la-Liberalizacion-del-Mercado-Energetico-de-la-UE, s.f.)

Fracaso de algunas empresas la exposición a la competencia en los mercados liberalizados puede llevar al fracaso de algunas empresas, lo que puede afectar la estabilidad y la confianza en el sistema. (El Proceso de Liberalización de los Sectores Energéticos, s. f.)

Inversión en infraestructura, la falta de inversión en infraestructura puede limitar la capacidad de los mercados liberalizados para satisfacer la creciente demanda de energía (El Proceso de Liberalización de los Sectores Energéticos, s. f.).

Cuestiones regulatorias, La regulación en los mercados liberalizados puede ser complicada y costosa, lo que puede dificultar la implementación de políticas públicas efectivas (El-Proceso-de-Liberalizacion-de-los-Sectores-Energeticos, s.f.)

"Introduction: Imperfect Competition in Electricity Markets." El autor examina la competencia imperfecta en los mercados eléctricos y sus implicaciones en términos de eficiencia

y regulación. El artículo de Joskow aborda la competencia imperfecta en los mercados de electricidad, destacando la complejidad de la liberalización y sus efectos sobre la eficiencia del mercado. Examina las limitaciones de la competencia en la generación de electricidad y proporciona perspectivas críticas sobre los desafíos regulatorios (Markets.", 2008)

La investigación de Joskow es esencial para comprender la dinámica competitiva en los mercados eléctricos liberalizados. Sin embargo, la complejidad del tema sugiere la necesidad de un enfoque multidimensional que incluya la interacción entre diferentes segmentos del mercado y la influencia de las tecnologías emergentes.

En otras palabras, los mercados energéticos liberalizados pueden ofrecer importantes beneficios en términos de eficiencia, competencia, innovación y sostenibilidad. Sin embargo, también pueden presentar desventajas, como desequilibrios del mercado, quiebras de algunas empresas, inversiones en infraestructura y problemas de regulación. La implementación exitosa de mercados energéticos liberalizados requiere una regulación efectiva y una infraestructura sólida para garantizar un suministro de energía eficiente y confiable (Liberalización de los Mercados Eléctricos: factores, 2018)

Dentro de estas tareas, juega un papel especial la generación, pues en esta clase de mercados se busca que, mediante mecanismos de libre competencia, las diferentes centrales de generación de energía eléctrica ofrezcan los mejores precios para así, definir aquellas que finalmente salen despachadas en función de la demanda a suplir en un tiempo determinado. Por ende, las diferentes empresas encargadas de la producción de energía han estado invirtiendo en la modernización de los centros de control y monitoreo. Así mismo, la necesidad de ofertar precios competitivos ha llevado al fortalecimiento de la innovación en estos centros de generación, lo

que se refleja en un notorio avance tecnológico (basado en la automatización) que conlleva cambios en la forma mediante la cual se controla la producción de energía.

A medida que el enfoque global cambia hacia prácticas sostenibles, los gobiernos y los reguladores están incentivando la adopción de tecnologías renovables. Esta tendencia presenta tanto oportunidades como desafíos para los participantes del mercado. La aparición de tecnologías de redes inteligentes ha revolucionado el mercado eléctrico. Las redes inteligentes permiten la comunicación bidireccional entre proveedores y consumidores de electricidad, lo que permite mecanismos eficientes de respuesta a la demanda y análisis de datos en tiempo real. Otra tendencia notable en los mercados eléctricos liberalizados es la creciente adopción de soluciones de almacenamiento de energía. El almacenamiento de energía juega un papel vital en el mantenimiento de la estabilidad de la red (<https://energy5.com/es/el-impacto-de-la-desregulaci243n-en-los-mercados-el233ctricos.>, s.f.)

De esta manera, la tendencia a la automatización, telecontrol y supervisión mediante centros de control central y monitoreo se ha popularizado en el sector eléctrico bajo la ideología de SmartWork, en donde se consolida la interacción hombre- máquina y se desarrollan sistemas inteligentes que permiten la integración de herramientas como Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) para evaluar, referenciar, predecir e identificar fallas, oportunidades y acciones de mejora en la generación de energía eléctrica.

La modernización de los centros de control y seguimiento conlleva importantes desafíos, como la integración de tecnologías emergentes, la gestión de la complejidad operativa y la ciberseguridad. Además, la transición a un sistema energético más moderno y sostenible requiere una inversión considerable y una planificación cuidadosa para garantizar la interoperabilidad y confiabilidad del sistema. (Pedro Linares, 2015)

Lo anterior, juega un papel fundamental en plantas de generación con asignación para Regulación Primaria de Frecuencia (RPF), pues estas unidades de generación deben dar soporte a los desbalances de frecuencia en el sistema eléctrico debido a cambios en la generación o demanda.

La regulación de frecuencia primaria (RPF) es un mecanismo utilizado en sistemas eléctricos para mantener la frecuencia de la red en un nivel constante. Las plantas de generación de energía eléctrica con asignación RPF son aquellas que tienen la capacidad de ajustar su producción de energía en respuesta a fluctuaciones en la oferta y la demanda. La monitorización de estas plantas desde los centros de control es fundamental para garantizar la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico. La integración de tecnologías de almacenamiento de energía y la adopción de fuentes de energía renovables son tendencias relevantes en este ámbito.

Para el caso colombiano, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) ha definido los requerimientos asociados a un generador habilitado para RPF, como los tiempos de respuesta, contribución de potencia y aporte sostenido de generación, los cuales deben ser debidamente monitoreados, permitiendo disponibilidad de la información en tiempo real y gestión de alertas, para así, garantizar la confiabilidad en el suministro energético.

Un estudio realizado en Ecuador evaluó la visión de la Regulación Primaria de Frecuencia a través de sistemas de almacenamiento de energía en baterías en el sistema eléctrico ecuatoriano. El estudio concluyó que la implementación de sistemas de almacenamiento de energía en baterías puede mejorar la estabilidad de la red y reducir la necesidad de plantas de generación de energía con asignación para RPF (Chamba, 2022)

La implementación de sistemas de almacenamiento de energía en baterías y la adopción de fuentes de energía renovables presentan importantes desafíos en términos de inversión y

planificación. Además, la integración de estas tecnologías en el sistema eléctrico requiere una infraestructura sólida y una regulación efectiva para garantizar la interoperabilidad y confiabilidad del sistema (A. Levy, 2021)

De esto modo, es necesario implementar un algoritmo que permita obtener una alerta temprana de las centrales de generación de diversas tecnologías, que permita verificar preventivamente el cumplimiento de regulación primaria ante eventos de frecuencia de gran impacto en el sistema eléctrico nacional, monitorear señales SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) y contar con herramientas útiles y aplicativos eficientes para la ejecución de acciones pertinentes en las centrales correspondientes.

La Regulación Primaria de Frecuencia es un mecanismo fundamental para garantizar la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico. La integración de tecnologías de almacenamiento de energía y la adopción de fuentes de energía renovables presentan importantes oportunidades para mejorar la sostenibilidad y la eficiencia del sistema. Sin embargo, es crucial abordar los desafíos asociados, como la inversión y la planificación, la interoperabilidad y la confiabilidad del sistema, para garantizar una transición exitosa hacia un sistema energético más moderno y sostenible. (A. Levy, 2021) (Chamba, 2022)

### **La Idea para la Investigación Aplicada**

La idea de investigación aplicada, se da con la propuesta de un algoritmo enfocado en la detección temprana de eventos de RPF(Regulación Primaria de Frecuencia), desarrollado en Python ya que es un software abierto de acceso libre y gratis, donde mediante un flujo eficiente ordenado y conectado a los sistemas SCADA, servidores de red de señales y automatizados con procesos digitales emita una alerta temprana en el centro respectivo y permita observar un diagnóstico preliminar de cumplimiento en regulación primaria de frecuencia ante fallos o eventos de gran magnitud del sistema interconectado nacional y el sistema eléctrico en general. Mediante las herramientas correctas, señales procesos y sistemas digitales poder coordinar todos estos factores en un flujo automático que permita activar el algoritmo y efectuar un análisis primario en las unidades de generación, centrales hidráulicas, térmicas y fotovoltaicas.

## Marco Referencial

### Estado del Arte

Se revisarán los avances tecnológicos y metodológicos existentes en el seguimiento y cumplimiento de la regulación primaria de frecuencia, destacando las soluciones actuales, sus ventajas y limitaciones.

Redes de Transmisión Inteligente-Beneficios y Riesgos.Smart Transmission Grids-Benefits and Risks.Ingeniería Investigación y Tecnología, 0 (0). DOI

En el anterior artículo, Redes de Transmisión Inteligente-Beneficios y Riesgos.Smart Transmission Grids-Benefits and Risks.Ingeniería Investigación y Tecnología, DOI se describe como la transición energética marcará un punto en la historia del planeta, en la forma como se genera, se transmite, se distribuye y se comercializa la energía eléctrica en el mundo, de manera tal que esta transición conlleva un cambio de tecnologías hacia sistemas sostenibles, sensibles, eficientes y más limpios involucrando nuevos sistemas en tecnología de punta 4.0, migración hacia las energías renovables de forma tal que la demanda de energía que cada día crece y que determina el crecimiento y la actividad económica de un país y la interacción económica del mundo describe que las Smart Transmission Grids-Benefits and Risks, son una forma nueva e inteligente de monitorear, rastrear y corregir las fallas en los sistemas energéticos de manera que las interrupciones de la prestación del servicio y la eficiencia del mismo se puedan mantener constantes y con la optimización operativa utilizando mecanismos de comunicación e información en tiempo real sin que llegue a demarcar límites en las fronteras donde se presta el servicio al usuario final (Velasco-Ramírez, (s. f.)

“Resumen— La Interconexión de objetos cotidianos con internet (IOT), es ampliamente usado en la ingeniería como en el monitoreo ambiental, ciudades inteligentes, entre otras.

En este trabajo se desarrolla un sistema de monitoreo y control remoto de un regulador de presión a través de una herramienta de comunicación IOT, utilizando como plataformas de programación MatLab® y HTML. El sistema de desarrollo para la adquisición y la comunicación corresponde a un Arduino Mega y el Shield de Ethernet respectivamente. Este sistema permite controlar la referencia del regulador de presión y monitorear la información de los transductores de la planta. Entre las ventajas de este tipo de desarrollos es que el servidor es gratuito y el sistema de desarrollo es de bajo costo, además con este tipo de proyectos se puede fortalecer la infraestructura de equipos de laboratorio en el área de ingeniería para poder ser manipulados de forma remota.” (Rodríguez Sote, 2017)

El anterior artículo describe esencialmente qué papel juega el internet de las cosas en los sistemas de comunicación, monitoreo y control o mejor conocido como telecontrol, ya que esta tendencia que viene dando pasos agigantados en la industria demarca en la actualidad en coordinación con la programación y los software dinámicos la automatización y trabajo remoto, monitorización, parametrización y operación de muchos centros industriales de producción en masa y a gran escala de diferentes productos, de manera tal que su enfoque primario nos demuestra cómo la tecnología llevada de la mano humana y usada de manera correcta instruye y construye un nuevo sentido y define una nueva forma de ver las plantas de trabajo desde la perspectiva SmartWork y eficiencia en la contribución de la implementación tecnológica y la transición a la tecnología 4.0

Los anteriores artículos reflejan como la evolución de los sistemas automáticos y de redes NGN, son adaptativos, convergentes y cambian en capacidad y acondicionamiento, lo que permite mayor conexión y acceso a la información, pero a su vez mayor restricción a nivel de

seguridad ya que se convierten en equipos vulnerables por su condición de IoT, o en su defecto red abierta.

“En la actualidad los datos han cobrado una importancia esencial en las organizaciones que se están transformando digitalmente y convirtiéndose en data centric para poder ofrecer un servicio de excelencia a todos sus stakeholders y tomar las mejores decisiones. En efecto, los avances tecnológicos que estamos viviendo en los últimos años, que nos permiten recoger y almacenar enormes cantidades de datos (por medio de dispositivos móviles, sensores, Internet de las cosas, big data, etc.), tratarlos mediante” (Piattini Velthuis, 2018)

El artículo anterior nos adentra en cómo la calidad, la información y la correcta administración de la misma, determina el avance, el crecimiento y la toma de decisiones independientemente de la profesión u oficio que se lleva a cabo en una compañía o lugar de trabajo, inclusive en el emprendimiento digital corresponde tal importancia que de ella dependen las inversiones y la transformación o adaptación tecnológica en la búsqueda de la transición digital y las nuevas formas de llevar a cabo los negocios, tal cual esto implica migración tecnológica, sistemas de monitoreo y detección de fallas, alertas digitalización y organización sistemática en programas adaptables y configurables a la tecnología del área que se pretende intervenir emitiendo un factor importante y determinante en los procesos de dinamismo y control total de los negocios y proyección en el almacenamiento y cuidado de la información.

Entonces esto nos recalca como la calidad, la importancia y el resguardo de la información en los sistemas NGN, deben llevar un enfoque de eficiencia transversal a la seguridad siendo paralela su condición e interoperabilidad procurando que se respeten las reglas de acceso, jerarquía, condición de validación y modificación de la misma, lo que se puede lograr

fomentando estructuras estandarizadas en la seguridad de información y ciber seguridad robusta ante ataques de esta índole.

“Implementación de un sistema de monitoreo de área amplia a escala de condiciones controladas producto de una planeación estratégica y monitoreo de diversos procesos mediante Sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de monitoreo de área amplia (WAMS), como sistema que alimenta aplicaciones de registros provenientes de unidades de medición fasorial sincronizadas (PMU)” (Alberto, Apodaca-ZamoraFederico, & Hugo, 2018)

De acuerdo al artículo anterior es importante describir que dentro de los sistemas de generación de energía y potencia, en los centros de producción o generación se utilizan los sistemas SCADA de manera enfática y constante, todos estos sistemas interconectados digitalizan y organizan la información en un software de interacción (IHM), demostrando que la operación, información y control son de carácter importante y eficiente para la continuidad del negocio, los sistemas de supervisión proveen al operador y al interactuar una herramienta dinámica de observación constante provista de parámetros y medidas sencillas pero proactivas en el control de los sistemas de, generación, transformación, potencia, transmisión y fuerza necesarios en el negocio de la energía eléctrica y sus centros operativos.

Los sistemas SCADA así como versátiles y homogéneos son sistemas cada vez más vulnerables que dependen de interconexión a redes externas en algunas ocasiones, ya que sus sistemas operativos provienen de desarrollos al público con reconocimiento en programación específica, de alguna manera su sistema operativo y desarrollo global permite que busque actualizaciones en la interfaz del sistema lo que puede desencadenar descarga de malware, virus en la red y actualizaciones de procedencia criminal o conexiones no autorizadas.

Según el artículo “Desarrollo y evaluación de un gateway móvil IoT para redes 4G LTE. Enfoque UTE”, en los sistemas de control y en la necesidad de interconectar todo en una sola red, es primordial cuando de automatización y de control se trata, es indispensable realizar la información hacerla confiable y asequible para el usuario que la requiere, por lo tanto en el desarrollo del internet de las cosas, en coordinación con los sistemas de enlace y control se busca darle una interacción en este caso a partir de plataformas como lo es el Android que sin duda es una de las más grandes del mundo por no decir que la que más usuarios tiene, y que a partir de esta se realizan desarrollos tecnológicos, de soporte, información, comunicación interacción y operación de distintos medios y servicios tecnológicos que ensamblan una red de información actualizada y compartida, en tiempo real y de manera que es óptima para la operación e implementación en otras áreas y disciplinas más específicas, sin ir más lejos la medición de energía a partir de medidores inteligentes, esta tecnología ya funciona en algunas áreas y está a la vanguardia con la medición veraz e inteligente de un servicio público primordial y de primera necesidad como lo es la energía eléctrica, solamente dependiendo de una red de comunicación, plataforma y conexión, se obtiene la medición de la energía de manera inmediata y controlada (Manuel, Patricio, Javier, & al, 2020).

Lo anterior se enfoca en determinar como el internet de las cosas abre paso a las nuevas tecnologías pero prioriza su desarrollo en los mecanismos de atención y servicios eficientes, la necesidad de conexión para dar soporte de información descarga en línea de datos, soporte inteligente y auditoria de la información, claramente evidencia una necesidad de sistemas de ciber seguridad, sistemas de reacción y sistemas de detección para consolidar la seguridad eficiente y optima en sistemas basado en IoT, redes NGN, telecontrol, que llevan la interacción a otro nivel a través de los centros de monitoreo y control en redes de telecomunicaciones.

## **Marco Conceptual**

El marco conceptual de esta investigación se centra en la integración de tecnologías avanzadas de comunicación de datos, como NGN aplicado en protocolos de control y señalización en redes NGN, hasta los servicios en redes NGN y sistemas de telecontrol, con aplicaciones y algoritmos de detección en el contexto de la regulación primaria de frecuencia. Esto implica la implementación de sensores avanzados, sistemas de monitoreo en tiempo real y algoritmos de control asociados a los sistemas SCADA que son adaptativos.

En este sentido, como ingeniero especialista en redes y telecomunicaciones NGN, es importante tener las habilidades necesarias para identificar fallas, normativas regulatorias, análisis de ingeniería e identificación de los factores, parámetros y eventos que en activos críticos y sistemas eléctricos se asocian con la programación la digitalización y la automatización de procesos productivos y optimización de estos.

Se abordarán las teorías y conceptos fundamentales que respaldan el desarrollo de algoritmos, como técnicas de procesamiento de datos, algoritmos de aprendizaje automático (si corresponde) y conceptos de monitoreo de eventos.

### **Centros de Monitoreo o Centros de Control**

Los centros de control son espacios en donde se reciben, procesan, monitorean y se guardan datos, los operadores son los encargados de vigilar o monitorear para reaccionar de manera inmediata ante cualquier evento que genere alarma.

Existen varios centros de control en especial para sistemas de seguridad, y otros centros como los de ENDESA, los cuales funcionan “el centro neurálgico desde el cual se controla el correcto funcionamiento de la transformación, transporte y distribución de la energía eléctrica.

Está formado por tres salas de control: la de alta tensión, la sala de media tensión y la sala de control de baja tensión”.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) ha desarrollado una serie de recomendaciones para la seguridad en el ciberespacio y la ciberseguridad en redes de datos y sistemas abiertos. Estas recomendaciones constituyen la base de los temas que deben estudiar las Comisiones de Estudio del UIT-T, que a su vez elaboran normas y recomendaciones técnicas para las telecomunicaciones. La adhesión a estas recomendaciones es voluntaria, pero puede contener determinadas disposiciones obligatorias para garantizar la aplicabilidad o la interoperabilidad (Nagrata, 2002)

### **Automatización en la Generación de Energía Eléctrica**

Se denomina así a un conjunto de procesos informáticos, mecánicos y electromecánicos, los cuales se operan con una intervención mínima de personal. Estos procesos se utilizan para optimizar el funcionamiento de los procesos industriales, los cuales se pueden ver reflejados en procesos empresariales, en la robótica de procesos, automatización en la infraestructura. Los cuales se definirán a continuación:

Automatización de la TI se usa un sistema de software para la creación de instrucciones y procesos repetibles, así se reemplaza la intervención humana.

Automatización empresarial adapta las gestiones de procesos empresariales como las BPM, BPA, BRM y la optimización de los negocios al desarrollo moderno de aplicaciones para responder a los cambios del mercado.

Para garantizar la seguridad de las redes NGN y los sistemas de control remoto, es necesario contar con profesionales capacitados en ciberseguridad [5]. Los ingenieros de redes inteligentes y ciberseguridad tienen la capacidad de administrar proyectos y servicios de TI,

además de diseñar, ejecutar y brindar mantenimiento a los sistemas de telecomunicaciones. Adquieren las habilidades gerenciales necesarias para trabajar en el área de redes digitales y telecomunicaciones para el manejo efectivo de la información y se actualizan constantemente sobre los cambios tecnológicos dentro de los sistemas de información y comunicaciones (Expósito, 2004)

Automatización robótica de procesos: Se utilizan robots de software para realizar tareas repetitivas, en este caso ya no se utilizará la intervención de las personas.

Automatización industrial, los procesos de producción que hacían parte de los esfuerzos por el trabajo humano se reducen, dado este tipo de automatización, en este caso la labor de los trabajadores se limita a la supervisión de las operaciones desde un panel de control.

La ciberseguridad se ha convertido en un tema de importancia mundial. Los ataques cibernéticos se han vuelto más frecuentes y sofisticados, lo que lleva a mayores costos y daños asociados con ellos. La ciberseguridad es un tema complejo que involucra una combinación de tecnología, procesos y políticas. La ciberseguridad es un esfuerzo continuo que requiere una constante evaluación e implementación de las medidas adecuadas para prevenir y mitigar los riesgos.

### **Redes de Transmisión Eléctrica**

El transporte de la energía eléctrica se realiza a través de las líneas de transporte de alta tensión que, junto con las subestaciones eléctricas, forman la red de transporte eléctrico, las líneas de distribución son las que llevan la energía desde las subestaciones hasta las empresas, los domicilios o los alumbrados públicos de los municipios. Los niveles de tensión utilizados son inferiores a 34.500 v. Las líneas de alta tensión están constituidas por un elemento conductor y por los elementos de soporte, estas, una vez reducida su tensión hasta la red de distribución,

conducen la corriente eléctrica a largas distancias. Una red de transporte eléctrico está mallada, los puntos están interconectados y aunque se produzca una incidencia en algún lugar, el abastecimiento sigue garantizado ya que puede llegar desde otra línea (MEG, 2020)

### **PLC en la Industria**

Un PLC es un controlador lógico programable de alto rendimiento, el cual permite programar una lógica para controlar los procesos industriales. Se trata de un dispositivo digital o computadora empleada en la automatización industrial, su objetivo es controlar las líneas de montaje en las fábricas mediante el control de las máquinas y sus respectivos procesos. El PLC es importante en la modernización de las industrias, ya que es fácil de programar e implementar, con procesos rápidos y precisos y a bajo costo de mantenimiento (Ecasam, 2021)

## **Delimitación del Estudio**

La implementación de tecnologías avanzadas de control y la optimización de las unidades de generación mejorarán la eficiencia y cumplimiento del servicio primario de regulación de frecuencia en Colombia, redundando en una mayor estabilidad del sistema eléctrico.

Para desarrollar este trabajo, se define una metodología conformada por tres fases (una por objetivo específico). A continuación, se definen las actividades y entregables de cada uno de estos objetivos:

### ***Objetivo Específico 1***

Definir las variables de monitoreo para alimentar el algoritmo con la data de alimentación variables y parámetros, el algoritmo emitirá una alerta temprana para la supervisión de la regulación primaria de frecuencia con base en una revisión de la normativa colombiana.

Ejecución del estudio a nivel de ingeniería detallada e identificación del proceso.

Recopilación de datos de históricos, valores y registros de centrales con asignación de cumplimiento en regulación primaria de frecuencia.

Obtención de informes técnicos y operativos del sistema eléctrico colombiano en los últimos 3 años.

Revisión de las resoluciones CREG 023 y CREG 025, así como de otros documentos normativos relevantes. Entregable: Documento con el resumen de la CREG 023 y 025.

### ***Objetivo Específico 2***

Proponer un algoritmo que permita tomar decisiones acertadas en eventos RPF el algoritmo permitirá tomar decisiones preventivas, acertadas y relacionadas a la regulación primaria de frecuencia en unidades de generación, a través de soluciones basadas en Redes de Nueva Generación y sistemas de telecontrol.

Análisis de cumplimiento del servicio primario de regulación de frecuencia: Evaluación del grado de cumplimiento de los agentes o agente generadores en relación con los parámetros de frecuencia establecidos.

Análisis de los mecanismos de seguimiento y sanciones aplicados por los entes reguladores.

Evaluación de las capacidades técnicas de las unidades de generación: Análisis de la disponibilidad y capacidad de respuesta de unidades de generación para regulación primaria de frecuencia.

Análisis de conexión y monitoreo a través de SCADA, señales PI de datos online, servidores locales y data de unidades de generación escogidas.

Clasificación, depuración y delimitación de señales pertinentes enlazadas con la comunicación establecida para definir los eventos de frecuencia.

Conexión a servidor local, registro, control, protección y parametrización de la data hacia aplicativo de mensajería. Entregable: Reporte preliminar de los modelos de frecuencia de eventos específicos y enlace de conexión a servidores y Telegram.

### ***Objetivo Específico 3***

Validar el algoritmo con datos en tiempo real y ejecutar a partir de simulaciones, se ejecutará y validará el algoritmo propuesto en tiempo real con base en datos históricos y simulaciones de eventos de regulación primaria para su aplicación en diferentes generadores del sistema interconectado nacional,

Propuesta de algoritmo inicial programación metódica en Python, pruebas de script, pruebas de escritorio y funcionamiento en tiempo real.

Establecimiento del proceso adecuado para la organización de la data recogida, asegurando su confiabilidad, confidencialidad, seguridad y eficiencia.

Prueba de escritorio en centrales, hidro, térmicas y solares.

Prueba de conexión y comunicación con servidor local, servidor externo y análisis de data en mensajería Telegram.

Implementación del código contemplando mejoras de las pruebas realizadas, errores de proceso y fallas de comunicación.

Análisis del script del código, análisis de la data, limpieza de proceso y retroalimentación del proceso hacia los sistemas para su optimización.

Reportes de la ejecución del proceso con respuesta estándar y establecimiento del flujo detallado. Entregable: Reporte estándar del análisis realizado por el algoritmo, grafico de los modelos y establecimiento de parámetros técnicos para tener en cuenta de la frecuencia de eventos detectados.

Como ejecución proceso de mejora e identificación de errores:

Evaluación de la necesidad de actualizar y optimizar equipos y sistemas de control.

Propuesta de soluciones de ingeniería: Identificación de tecnologías de control avanzadas adecuadas para mejorar la eficiencia y el cumplimiento del servicio.

Estimación de costos y beneficios asociados a la implementación de las soluciones propuestas.

Esta delimitación establece claramente los límites y el enfoque específico del proyecto de grado, lo que permite centrarse en áreas clave de investigación y desarrollo. Se podrán ajustar las limitaciones según las pautas y los recursos disponibles para el proyecto.

En cuanto a la importancia del desarrollo se da a través del código preliminar que podría evolucionar siempre y cuando las herramientas, factores, señales y tecnología lo permita, determinando el rango de aplicación y las fuentes o procesos digitalizados a medida que vayan saliendo actualizaciones y secuencias de programación más dinámicas incluso abordando la posibilidad de tecnologías en inteligencia artificial. Incluyendo la ciberseguridad para redes NGN y sistemas de control remoto, siendo fundamental para garantizar la protección de los usuarios y empresas que dependen de estas tecnologías. Además, la implementación de medidas de seguridad adecuadas puede evitar la pérdida de información crítica y minimizar el impacto económico en caso de presentarse ciberataques.

## **Bases de Estudio**

Resoluciones CREG 023 y CREG 025.

Informes técnicos y operativos del sistema eléctrico colombiano.

Entrevistas con representantes de los agentes generadores y entes reguladores.

Estudios previos sobre regulación primaria de frecuencia en otros países.

Población:

Agentes generadores de energía en Colombia.

Entidades reguladoras del sector eléctrico.

Sistema eléctrico interconectado nacional.

Ejecución del estudio

Recopilación de datos

Obtención de informes técnicos y operativos del sistema eléctrico colombiano en donde el agente generador ha tenido fluctuaciones o impactos al SIN en los últimos 3 años.

Revisión de las resoluciones CREG 023 y CREG 025, así como de otros documentos normativos relevantes.

Análisis de cumplimiento del servicio primario de regulación de frecuencia: Evaluación del grado de cumplimiento de los agentes generadores en relación con los parámetros de frecuencia establecidos.

Análisis de los mecanismos de seguimiento y sanciones aplicados por los entes reguladores.

Evaluación de las capacidades técnicas de las unidades de generación: Análisis de la disponibilidad y capacidad de respuesta de unidades de generación para regulación primaria de frecuencia.

Evaluación de la necesidad de actualizar y optimizar equipos y sistemas de control.

Propuesta de soluciones de ingeniería: Identificación de tecnologías de control avanzadas adecuadas para mejorar la eficiencia y el cumplimiento del servicio.

Estimación de costos y beneficios asociados a la implementación de las soluciones propuestas.

Evaluación de impacto y recomendaciones:

Análisis del impacto de las soluciones propuestas en la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico.

Generación de recomendaciones para fortalecer la prestación del servicio primario de regulación de frecuencia en Colombia.

Posibles datos, áreas y resultados:

Cumplimiento de los parámetros de frecuencia por parte de los agentes generadores.

Disponibilidad y capacidad de respuesta de las unidades de generación.

Evaluación de la efectividad de la propuesta de algoritmo de detección en sistemas piloto seleccionados.

Identificación de puntos críticos en sistemas de control remoto, centros de control de generación de energía y redes eléctricas que requieren ajustes e intervención técnica en equipos específicos.

Análisis de la viabilidad y factibilidad de la implementación de la propuesta del algoritmo en diferentes sectores de la industria.

Eficiencia de las tecnologías de control avanzadas implementadas.

Identificación de las mejores prácticas y recomendaciones para la gestión de datos cumplimiento y regulación primaria de frecuencia en diferentes centrales de diferentes

tecnologías, en sistemas de control remoto, centros de control de generación de energía y redes eléctricas.

Impacto en la estabilidad del sistema eléctrico.

Contribución a la mejora de la fiabilidad, disponibilidad e integridad de los sistemas críticos, lo que podría reducir los costes asociados a multas, penalizaciones y seguridad de respuesta ante los eventos de frecuencia, aumentando la seguridad del suministro eléctrico y otros servicios críticos.

Recomendaciones para mejorar la prestación del servicio primario de regulación de frecuencia en Colombia.

Identificación de los posibles impactos sociales y ambientales de un evento de gran magnitud que saque de servicio todo el sistema interconectado nacional y los sistemas críticos asociados a él, permitiendo emitir recomendaciones para su gestión.

## **Resultados y Entregables de Objetivos Específicos**

### **Objetivo Específico 1**

CREG023 establece las normas y lineamientos para el funcionamiento eficiente y equitativo del mercado eléctrico en Colombia. Este documento aborda aspectos fundamentales como la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica. Define los criterios para la asignación de contratos de largo plazo, la regulación de tarifas y la participación de agentes en el mercado. Además, establece mecanismos para promover la competencia, garantizar la seguridad energética y promover el uso de fuentes de energía renovables.

CREG025 se enfoca en la regulación de redes eléctricas en el contexto del mercado energético colombiano. Define las normas técnicas y de seguridad que deben cumplir las redes de transmisión y distribución de energía eléctrica. Establece criterios para la planificación, diseño, construcción y operación de estas redes, con el fin de garantizar la confiabilidad del suministro eléctrico y la integración eficiente de nuevas tecnologías. Además, aborda aspectos como la calidad del servicio, la gestión de la demanda y la protección del medio ambiente en el marco de la operación de las redes eléctricas.

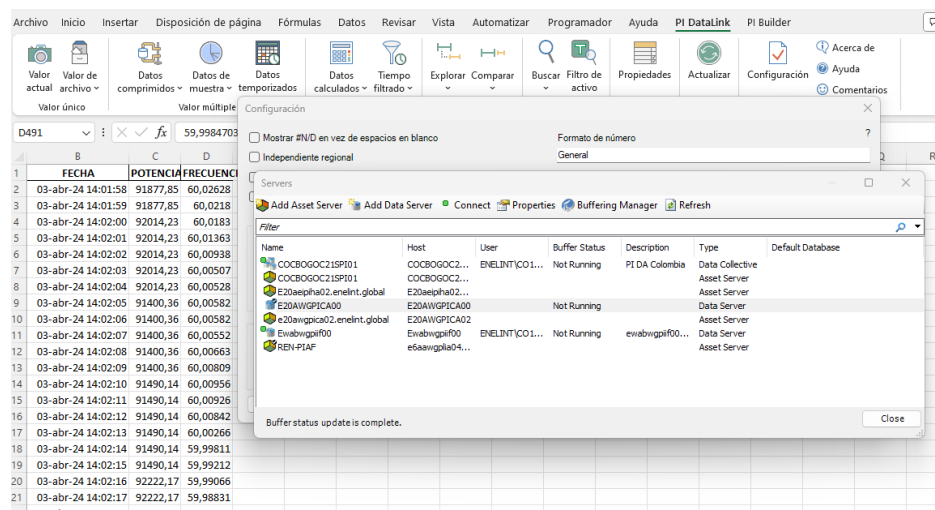
El mecanismo de verificación de la regulación primaria de frecuencia emitido por la XM tiene como objetivo garantizar la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico en Colombia. Se centra en la regulación de la frecuencia de operación de las centrales eléctricas, asegurando que se mantenga dentro de los límites establecidos para asegurar la adecuada sincronización del sistema eléctrico nacional. Este mecanismo define los procedimientos y criterios para monitorear y corregir las desviaciones de frecuencia, así como las sanciones por incumplimiento.

## Objetivo Específico 2

La validación del algoritmo evidencia el desarrollo inicial a su vez permite ejemplificar el proceso llevando a cabo un ordenamiento del código a partir de los parámetros de la base de estudio, conceptos, sistemas, objetivos y normatividad asociada al mismo.

**Figura 2**

### Conexión a Servidor Local SCADA PI



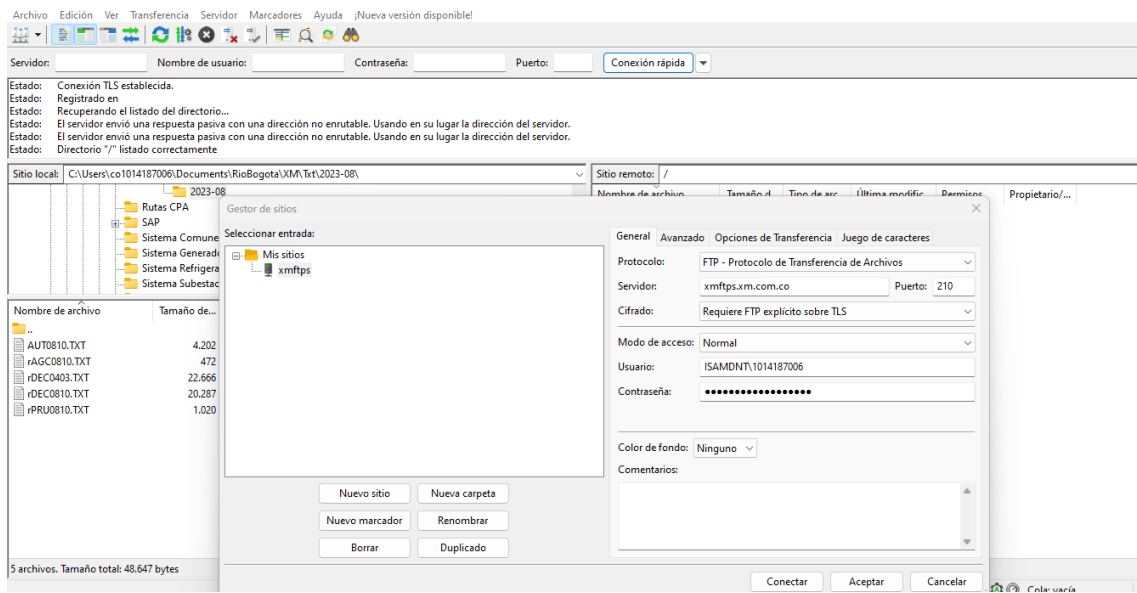
**Figura 3**

### Conexión a SCADA PI y Parámetros



## Figura 4

### Conexión a Servidor Externo XM Reportes Eventos



## Figura 5

### Código de Proceso Desarrollado en Python

```

FreqSense_v2.0.py - C:\Users\co1014187006\venvs\FreqSense\FreqSense_v2.0.py (3.11.3)
File Edit Format Run Options Window Help
#Agregar líneas informativas por si se desea modificar o actualizar el código. Si se tienen dudas por favor contactarme antes de: Jose Garcia
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
from tkinter import Tk, filedialog
from datetime import timedelta
from scipy.integrate import simpson
import os
from fpdf import FPDF
import win32com.client as win32
from openpyxl import Workbook
import time
import random
from matplotlib.dates import DateFormatter

#Esta sección es para habilitar la selección de carpeta donde estaran los archivos a evaluar RFF
def seleccionar_carpeta():
    root = Tk()
    root.withdraw()
    carpeta = filedialog.askdirectory()
    return carpeta

#Esta sección parametriza la configuración del excel, es decir, debe tener tres columnas llamadas en su orden FECHA, POTENCIA y FRECUENCIA. Adicional solo se puede arc
def cargar_datos(archivo):
    try:
        df = pd.read_excel(archivo, usecols=['FECHA', 'POTENCIA', 'FRECUENCIA'])
        df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])
        return df
    except Exception as e:
        print(f"Error al cargar el archivo: {e}")
        return None

#Esta sección es para suavizar la tendencia cuando hay eventos donde la frecuencia varía bruscamente
def suavizar_tendencia(df):
    mask = abs(df['FRECUENCIA'].pct_change()) > 0.0003
    for idx, row in df[mask].iterrows():
        if idx > 0:
            df.loc[idx, ['FRECUENCIA', 'POTENCIA']] = df.loc[idx - 1: idx, ['FRECUENCIA', 'POTENCIA']].mean()

#Enviar email via Outlook, es importante tener en cuenta que esta línea usa las credenciales de sesión para enviar email, osea que si se usa en un PC que no tiene Outlook

```

## Figura 6

### Proceso de Programación

```
#Enviar email via Outlook, es importante tener en cuenta que esta linea usa las credenciales de sesion para enviar email, osea que si se usa en un PC que no tiene Outlook
def enviar_pdf_por_email(destinatarios, asunto, mensaje, archivo_pdf):
    try:
        outlook = win32.Dispatch('outlook.application')
        correo = outlook.CreateItem(0)
        correo.Subject = asunto
        correo.Body = mensaje
        correo.To = ":".join(destinatarios)

        attachment = archivo_pdf
        correo.Attachments.Add(attachment)
        correo.Send()
        print("Correo enviado exitosamente.")
    except Exception as e:
        print(f"Error al enviar el correo: {e}")

#Seccion para analizar la data
def analizar_regulacion(df):
    resultados = []

    # Encontrar el evento de mayor cambio de frecuencia, esto a que la frecuencia puede salir del umbral varias veces pero se analizar el de mayor impacto
    idx_max_cambio_frec = abs(df['FRECUENCIA'].diff()).idxmax()

    # Paso 4: Tiempo de respuesta, el objetivo es analizar que la potencia tenga respuesta antes de 10 segundos
    print('Evaluando tiempo de respuesta...')
    tiempo_evento = df.loc[idx_max_cambio_frec, 'FECHA']
    tiempo_limite = tiempo_evento + timedelta(seconds=10)
    potencia_inicial = df.loc[idx_max_cambio_frec, 'POTENCIA']
    frecuencia_inicial = df.loc[idx_max_cambio_frec, 'FRECUENCIA']

    df_10s = df[(df['FECHA'] > tiempo_evento) & (df['FECHA'] <= tiempo_limite)]

    if not df_10s.empty:
        resultado_tiempo_respuesta = "No evaluado"

        if frecuencia_inicial >= 60.03:
            if (df_10s['POTENCIA'] < potencia_inicial).any():
                resultado_tiempo_respuesta = "Cumplió regulación por tiempo de respuesta menor o igual a 10 seg."
            else:
                resultado_tiempo_respuesta = "No cumplió regulación por tiempo de respuesta."
        elif frecuencia_inicial <= 59.97:
```

## Figura 7

### Análisis de Datos Enlazados

```

        resultado_estatismo = "No cumplió regulación por aporte sostenido mayor o igual a 30 seg."
        break
    elif frecuencia_inicial <= 59.97:
        if promedio_potencia_30s > promedio_potencia_16s_anterior:
            resultado_estatismo = "Cumplió regulación por aporte sostenido mayor o igual a 30 seg."
            break
        else:
            resultado_estatismo = "No cumplió regulación por aporte sostenido mayor o igual a 30 seg."
            break

    if 59.97 <= frecuencia_final <= 60.03:
        break

    tiempo_fin_estatismo += timedelta(seconds=30)
    df_30s = df[(df['FECHA'] > tiempo_evento) & (df['FECHA'] <= tiempo_fin_estatismo)]
    if df_30s.empty:
        break

    frecuencia_final = df_30s['FRECUENCIA'].iloc[-1]

    resultados.append((tiempo_evento, resultado_tiempo_respuesta, resultado_aporte, resultado_estatismo))
    print('Análisis de regulacion finalizado...')

    return resultados, idx_max_cambio_frec

def main():
    carpeta = seleccionar_carpeta()
    if carpeta:
        pdf = FPDF()
        pdf.set_auto_page_break(auto=True, margin=15)

        # Inicializa un string para almacenar los resultados
        resultados_email = ""

        for archivo in os.listdir(carpeta):
            if archivo.endswith(".xlsx"):
                ruta_archivo = os.path.join(carpeta, archivo)
                df = cargar_datos(ruta_archivo)
                print(str(archivo), ' Cargado...')
                if df is not None:
```

## Figura 8

### Parametrización y Clasificación

```

if (df_10s['POTENCIA'] > potencia_inicial).any():
    resultado_tiempo_respuesta = "Cumplió regulación por tiempo de respuesta menor o igual a 10 seg."
else:
    resultado_tiempo_respuesta = "No cumplió regulación por tiempo de respuesta."

# Paso 5: Aporte, el objetivo es evaluar que el aporte de potencia fuese superior al 3%
print('Evaluando aporte sostenido...')
resultado_aporte = "No evaluado."
cambio_potencia = abs(df_10s['POTENCIA'].iloc[-1] - potencia_inicial)

if frecuencia_inicial >= 60.03 and cambio_potencia >= 0.03 * potencia_inicial:
    resultado_aporte = "Cumplió regulación por aporte de potencia mayor o igual al 3%."
elif frecuencia_inicial <= 59.97 and cambio_potencia >= -0.03 * potencia_inicial:
    resultado_aporte = "Cumplió regulación por aporte de potencia mayor o igual al 3%."
else:
    resultado_aporte = "No cumplió regulación por aporte de potencia."

# Paso 6: Estatismo, el objetivo es evaluar si la potencia se sostuvo por al menos 30 segundos (Una vez se inicia el evento, se promedia paquetes de 30 seg
print('Evaluando estatismo...')
resultado_estatismo = "No evaluado."

tiempo_fin_estatismo = tiempo_evento + timedelta(seconds=30)
df_30s = df[(df['FECHA'] > tiempo_evento) & (df['FECHA'] <= tiempo_fin_estatismo)]

if not df_30s.empty:
    frecuencia_final = df_30s['FRECUENCIA'].iloc[-1]

    tiempo_anterior = tiempo_evento - timedelta(seconds=16)
    df_16s_anterior = df[(df['FECHA'] >= tiempo_anterior) & (df['FECHA'] < tiempo_evento)]

    if not df_16s_anterior.empty:
        promedio_potencia_16s_anterior = df_16s_anterior['POTENCIA'].mean()

    while True:
        promedio_potencia_30s = df_30s['POTENCIA'].mean()

        if frecuencia_inicial >= 60.03:
            if promedio_potencia_30s < promedio_potencia_16s_anterior:
                resultado_estatismo = "Cumplió regulación por aporte sostenido mayor o igual a 30 seg."
                break
    .....

```

## Figura 9

### Evaluación de Parámetros

```

print('Suavizando tendencia para ', str(archivo), '...')
suavizar_tendencia(df)
print('Analizando regulacion para ', str(archivo), '...')
resultados, idx_max_cambio_frec = analizar_regulacion(df)

cumplimiento_total = True
for resultado in resultados:
    tiempo_evento, resultado_tiempo_respuesta, resultado_aporte, resultado_estatismo = resultado
    if "No cumplió" in resultado_tiempo_respuesta or "No cumplió" in resultado_aporte or "No cumplió" in resultado_estatismo:
        cumplimiento_total = False
        break
if cumplimiento_total:
    resultados_email += f"\nPara {archivo[:5]}: Cumplió con los requerimientos."
else:
    resultados_email += f"\nPara {archivo[:5]}: No cumplió con los requerimientos."

limite_inferior = 60 - 0.03
limite_superior = 60 + 0.03

# Obtener el rango de tiempo para el gráfico.
tiempo_evento = df.loc[idx_max_cambio_frec, 'FECHA']
inicio_grafico = tiempo_evento - timedelta(minutes=3)
fin_grafico = tiempo_evento + timedelta(minutes=3)

# Filtrar los datos para el gráfico.
df_grafico = df[(df['FECHA'] >= inicio_grafico) & (df['FECHA'] <= fin_grafico)]

fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(30,15))
num_ticks = 10
# Formateo de las fechas
date_form = DateFormatter("%Y-%m-%d %H:%M:%S") # Ajusta el formato aqui
ax1.xaxis.set_major_formatter(date_form)

# Suponemos que 'plant' es un valor constante en tu caso. Lo establecemos como una cadena vacia.
plant = ''
time = str(tiempo_evento)
ax2 = ax1.twinx()

print('Graficando ', str(archivo), '...')
ax1.plot(df_grafico['FECHA'], df_grafico['POTENCIA'], c='darkblue', label='Potencia')
ax1.set_ylabel('Potencia [MW]')

```

## Figura 10

### Graficación de Modelos

```

ax1.autoscale_view()
ax1.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
#ax1.set_ylim(df_grafico['POTENCIA'].mean()*0.95, df_grafico['POTENCIA'].mean()*1.05)
tick_positions = ax1.get_xticks()
step = int(len(tick_positions)/num_ticks)
# Asegurarse de que el step no sea cero
if step == 0:
    step = 1
ax1.set_xticks(ticks=tick_positions[::step])
ax1.set_xlabel('Hora')
ax1.legend(loc='upper left')

ax2.plot(df_grafico['FECHA'], df_grafico['FRECUENCIA'], c='orange', label='Frecuencia')
ax2.set_ylabel('Frecuencia [Hz]')
ax2.autoscale_view()
ax2.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
#ax2.set_ylim(59.7, 60.3)
ax2.axhline(limite_inferior, color='black', linestyle='--')
ax2.axhline(limite_superior, color='black', linestyle='--')
ax2.axvline(tiempo_evento + timedelta(seconds=30), color='red', linestyle='--', label='Segundo 30')
ax1.xaxis.label.set_size(20)
ax1.yaxis.label.set_size(20)
ax2.yaxis.label.set_size(20)
plt.title(f'Evaluación Evento de frecuencia\n(plant)\n(time)\n')
plt.legend()

# Guardar gráfico como imagen
nombre_imagen = os.path.join(carpeta, archivo[:-5] + '.png')
plt.savefig(nombre_imagen, dpi=200) # Para aumentar la resolución del gráfico
plt.close(fig)

# Agregar imagen al PDF
print('Agregando imagen a pdf...')
pdf.add_page()
pdf.set_font("Arial", size=12)
pdf.cell(200, 10, txt=archivo[:-5], ln=1, align="C")
pdf.image(nombre_imagen, x=10, y=30, w=190)
os.remove(nombre_imagen)

#Añadir resultados al PDF
pdf.set_y(170) # Ajustar la posición en el eje y de las celdas de texto
if resultados:

```

## Figura 11

### Resultados Ordenados

```

#Añadir resultados al PDF
pdf.set_y(170) # Ajustar la posición en el eje y de las celdas de texto
if resultados:
    for resultado in resultados:
        tiempo_evento, resultado_tiempo_respuesta, resultado_aporte, resultado_estadismo = resultado
        pdf.cell(200, 10, txt=f"Fecha del evento: {tiempo_evento}", ln=1, align="L")
        pdf.cell(200, 10, txt=f"Tiempo de respuesta: {resultado_tiempo_respuesta}", ln=1, align="L")
        pdf.cell(200, 10, txt=f"Aporte en respuesta: {resultado_aporte}", ln=1, align="L")
        pdf.cell(200, 10, txt=f"Aporte sostenido: {resultado_estadismo}", ln=1, align="L")
    else:
        pdf.cell(200, 10, txt="No se encontraron resultados", ln=1, align="L")

# Guardar PDF en la carpeta
pdf.output(os.path.join(carpeta, "Resultados_de_RPF.pdf"))

#Sección para enviar el email
print('Enviando email...')
pdf_path = os.path.join(carpeta, "Resultados_de_RPF.pdf")
pdf.output(pdf_path)

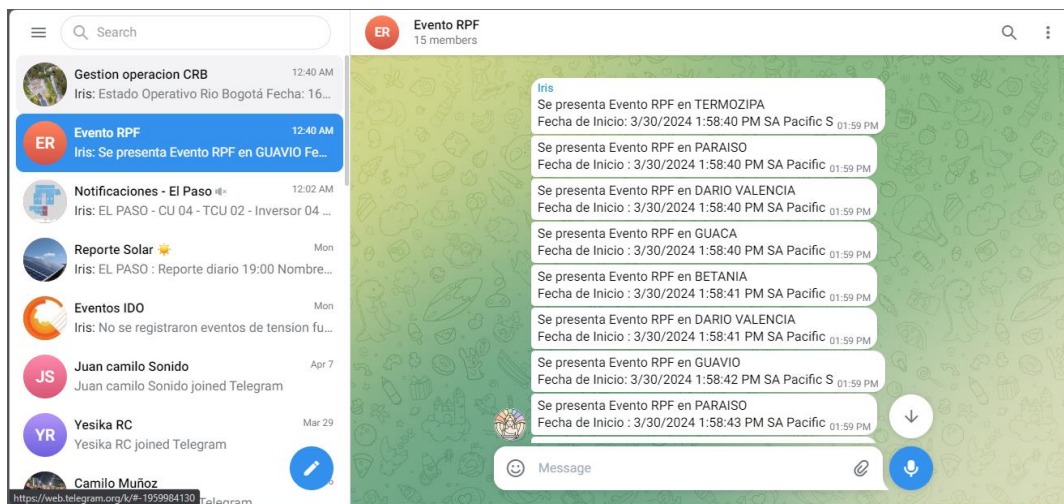
destinatarios = ["jgarciah@unadvirtual.edu.co"]
asunto = f'FreqSensei: Evaluación Desempeño RPF {tiempo_evento}'
mensaje = f'Estimados, Relacionamos análisis preliminar de desempeño RPF, ejecutado mediante FreqSensei en el evento de fecha {tiempo_evento}, esto se realizó.'
mensaje = f'Estimados, Relacionamos análisis preliminar de desempeño RPF, ejecutado mediante FreqSensei en el evento de fecha {tiempo_evento}, esto se realizó.'
enviar_pdf_por_email(destinatarios, asunto, mensaje, pdf_path)

if __name__ == "__main__":
    main()

```

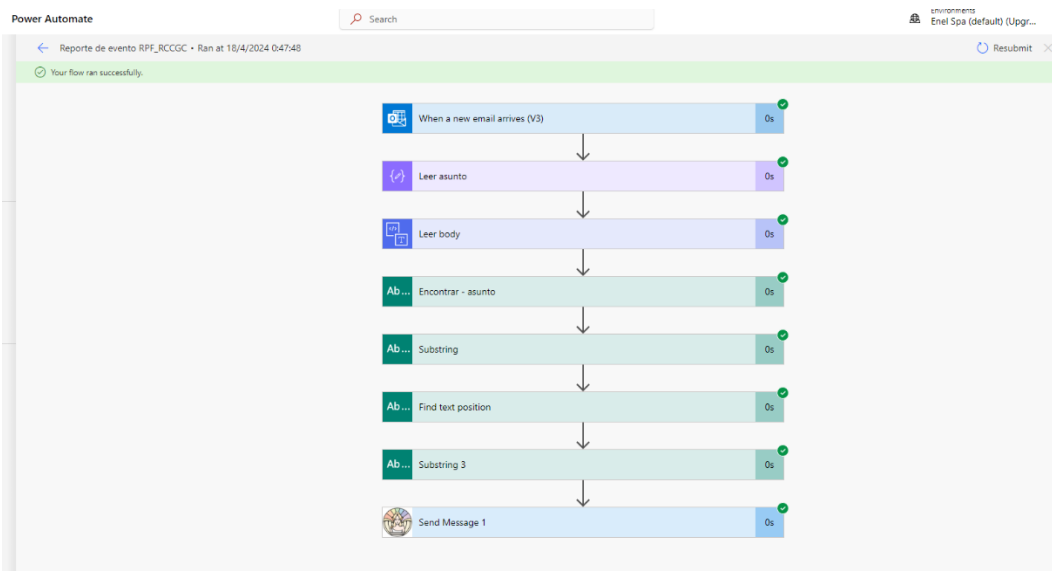
**Figura 12**

*Reporte Inicial de Modelos de Frecuencia, Conexión a Servidores y Telegram*



**Figura 13**

*Flujo Power Automate, RPF a Bot Telegram*



### Objetivo Específico 3

El reporte del paso a paso del algoritmo propuesto se presenta mediante un entorno virtual que permite que no entre en conflicto con otros programas que se puedan ejecutar al mismo tiempo, dándole independencia objetividad y libre análisis a la data suministrada para la evaluación de los parámetros solicitado en frecuencia y aporte sostenido del sistema RPF.

### Figura 14

#### *Proceso de Ejecución en Entorno Virtual*

```
Agregando imagen a pdf...
Generador 4 oriental.xlsx cargado...
Suavizando tendencia para Generador 4 oriental.xlsx ...
Analizando regulacion para Generador 4 oriental.xlsx ...
Evaluando tiempo de respuesta...
Evaluando aporte sostenido...
Evaluando estatismo...
Análisis de regulacion finalizado...
Graficando Generador 4 oriental.xlsx ...
Agregando imagen a pdf...
Generador Rio Bogota.xlsx cargado...
Suavizando tendencia para Generador Rio Bogota.xlsx ...
Analizando regulacion para Generador Rio Bogota.xlsx ...
Evaluando tiempo de respuesta...
Evaluando aporte sostenido...
Evaluando estatismo...
Análisis de regulacion finalizado...
Graficando Generador Rio Bogota.xlsx ...
Agregando imagen a pdf...
Generador Termico 1.xlsx cargado...
Suavizando tendencia para Generador Termico 1.xlsx ...
Analizando regulacion para Generador Termico 1.xlsx ...
Evaluando tiempo de respuesta...
Evaluando aporte sostenido...
Evaluando estatismo...
Análisis de regulacion finalizado...
Graficando Generador Termico 1.xlsx ...
Agregando imagen a pdf...
Generador Termico 2.xlsx cargado...
Suavizando tendencia para Generador Termico 2.xlsx ...
```

Figura 15

*Validación de Datos Suministrados*

```

Símbolo del sistema
Analizando regulacion para Generador Termico 3.xlsx ...
Evaluando tiempo de respuesta...
Evaluando aporte sostenido...
Evaluando estadismo...
Análisis de regulacion finalizado...
Graficando Generador Termico 3.xlsx ...
Agregando imagen a pdf...
GeneradorHuila.xlsx cargado...
Suavizando tendencia para GeneradorHuila.xlsx ...
Analizando regulacion para GeneradorHuila.xlsx ...
Evaluando tiempo de respuesta...
Evaluando aporte sostenido...
Evaluando estadismo...
Análisis de regulacion finalizado...
Graficando GeneradorHuila.xlsx ...
Agregando imagen a pdf...
C:\Users\co1014187006\venvs\freqsensei\FreqSensei_v2.0.py:28: UserWarning: Could not infer format, so each element will
be parsed individually, falling back to 'dateutil'. To ensure parsing is consistent and as-expected, please specify a fo
rmat.
    df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])
Huila 2 hidro.xlsx cargado...
Suavizando tendencia para Huila 2 hidro.xlsx ...
Analizando regulacion para Huila 2 hidro.xlsx ...
Evaluando tiempo de respuesta...
Evaluando aporte sostenido...
Evaluando estadismo...
Análisis de regulacion finalizado...
Graficando Huila 2 hidro.xlsx ...
Agregando imagen a pdf...
C:\Users\co1014187006\venvs\freqsensei\FreqSensei_v2.0.py:28: UserWarning: Could not infer format, so each element will

```

Figura 16

*Finalización del Proceso y Envío de Correo*

```

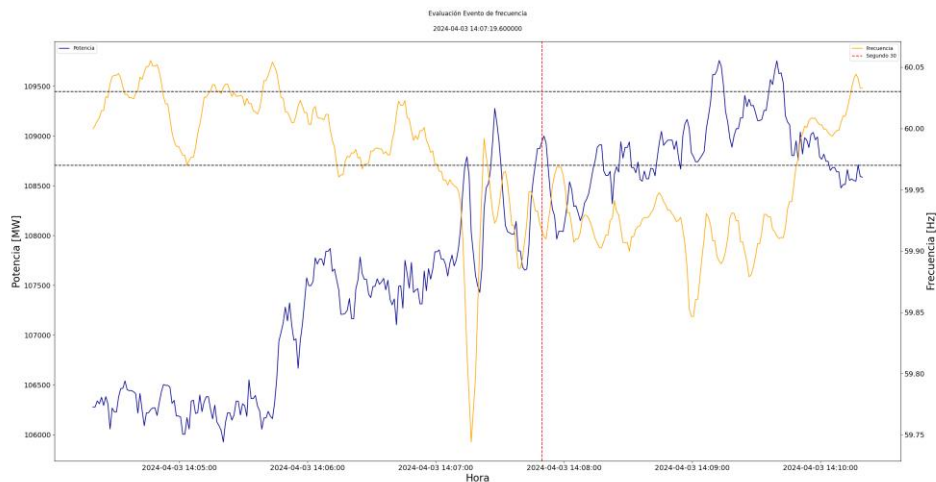
Símbolo del sistema
Evaluando estadismo...
Análisis de regulacion finalizado...
Graficando Huila 2 hidro.xlsx ...
Agregando imagen a pdf...
C:\Users\co1014187006\venvs\freqsensei\FreqSensei_v2.0.py:28: UserWarning: Could not infer format, so each element will
be parsed individually, falling back to 'dateutil'. To ensure parsing is consistent and as-expected, please specify a fo
rmat.
    df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])
Huila1 hidro.xlsx cargado...
Suavizando tendencia para Huila1 hidro.xlsx ...
Analizando regulacion para Huila1 hidro.xlsx ...
Evaluando tiempo de respuesta...
Evaluando aporte sostenido...
Evaluando estadismo...
Análisis de regulacion finalizado...
Graficando Huila1 hidro.xlsx ...
Agregando imagen a pdf...
Parque solar1.xlsx cargado...
Suavizando tendencia para Parque solar1.xlsx ...
Analizando regulacion para Parque solar1.xlsx ...
Evaluando tiempo de respuesta...
Evaluando aporte sostenido...
Evaluando estadismo...
Análisis de regulacion finalizado...
Graficando Parque solar1.xlsx ...
Agregando imagen a pdf...
Enviando email...
Correo enviado exitosamente.

(freqsensei) C:\Users\co1014187006\venvs\freqsensei>

```

## Figura 17

### Generador Oriental 1



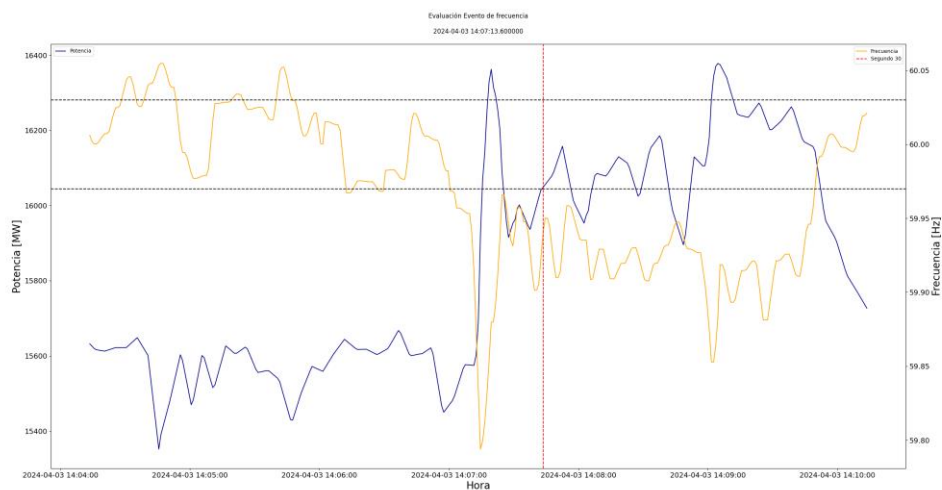
Los resultados obtenidos para varios generadores de varias zonas evaluadas se presentan con el formato asignado por la programación de los parámetros evaluados en potencia vs frecuencia identificando los valores de cumplimiento según la normatividad.

Fecha del evento: 2024-04-03 14:07:19.60

Tiempo de respuesta: Cumplió regulación por tiempo de respuesta menor o igual a 10 seg.

Aporte en respuesta: Cumplió regulación por aporte de potencia mayor o igual al 3%.

Aporte sostenido: Cumplió regulación por aporte sostenido mayor o igual a 30 seg.

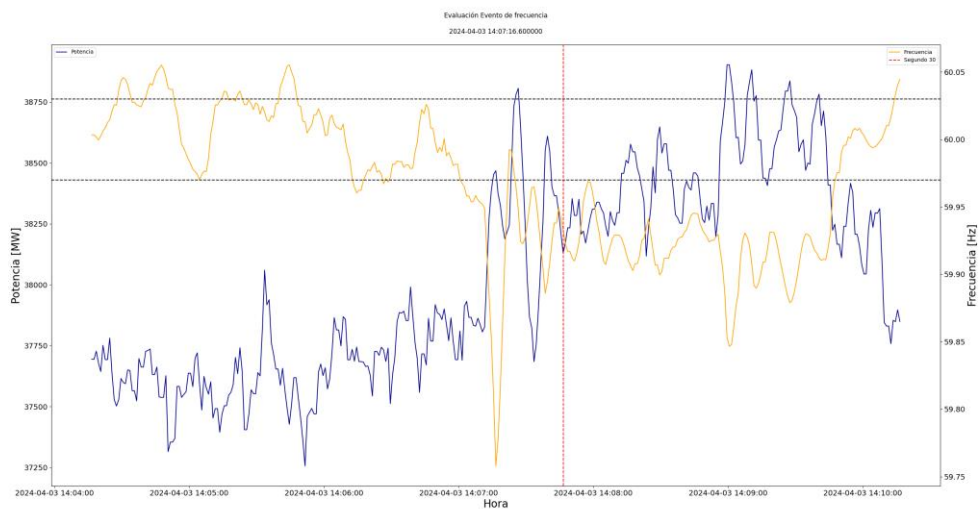
**Figura 18***Generador Térmico 1*

Fecha del evento: 2024-04-03 14:07:13.60

Tiempo de respuesta: Cumplió regulación por tiempo de respuesta menor o igual a 10 seg.

Aporte en respuesta: Cumplió regulación por aporte de potencia mayor o igual al 3%.

Aporte sostenido: Cumplió regulación por aporte sostenido mayor o igual a 30 seg.

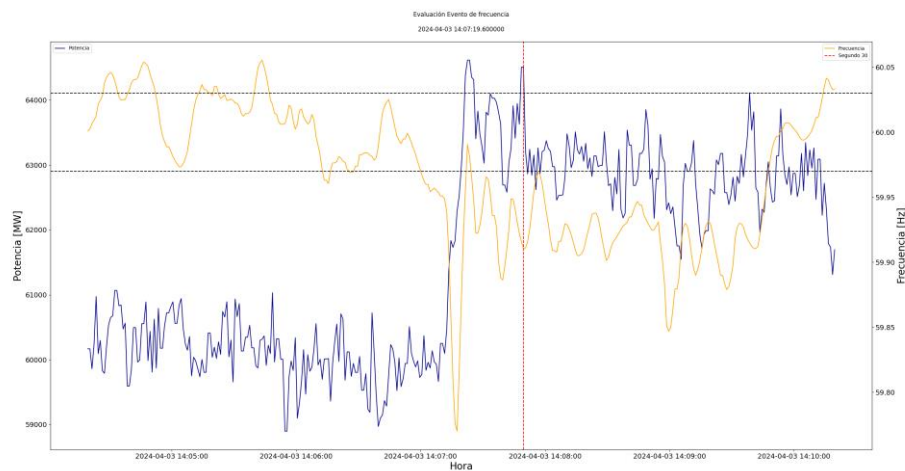
**Figura 19***Generador Rio Bogotá*

Fecha del evento: 2024-04-03 14:07:16.60

Tiempo de respuesta: Cumplió regulación por tiempo de respuesta menor o igual a 10 seg.

Aporte en respuesta: Cumplió regulación por aporte de potencia mayor o igual al 3%.

Aporte sostenido: Cumplió regulación por aporte sostenido mayor o igual a 30 seg.

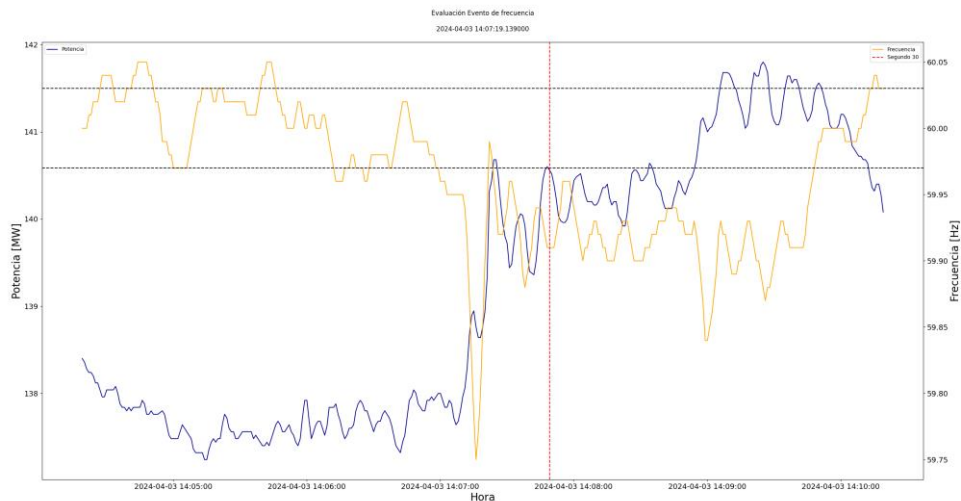
**Figura 20***Generador Huila 1*

Fecha del evento: 2024-04-03 14:07:19.60

Tiempo de respuesta: Cumplió regulación por tiempo de respuesta menor o igual a 10 seg.

Aporte en respuesta: Cumplió regulación por aporte de potencia mayor o igual al 3%.

Aporte sostenido: Cumplió regulación por aporte sostenido mayor o igual a 30 seg.

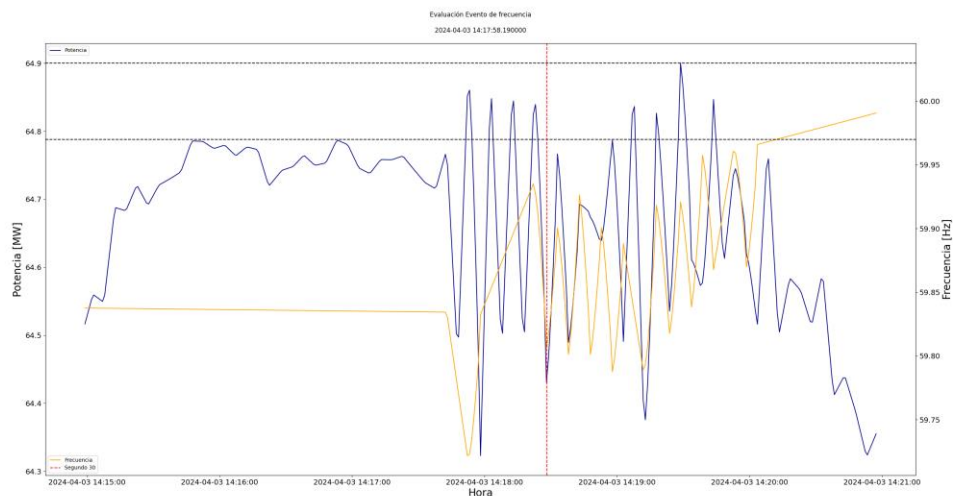
**Figura 21***Huila Hidro 1*

Fecha del evento: 2024-04-03 14:07:19.139000

Tiempo de respuesta: Cumplió regulación por tiempo de respuesta menor o igual a 10 seg.

Aporte en respuesta: Cumplió regulación por aporte de potencia mayor o igual al 3%.

Aporte sostenido: Cumplió regulación por aporte sostenido mayor o igual a 30 seg.

**Figura 22***Parque Solar 1*

Fecha del evento: 2024-04-03 14:17:58.190000

Tiempo de respuesta: Cumplió regulación por tiempo de respuesta menor o igual a 10 seg.

Aporte en respuesta: Cumplió regulación por aporte de potencia mayor o igual al 3%.

Aporte sostenido: No cumplió regulación por aporte sostenido mayor o igual a 30 seg.

**Tabla 1***Ficha de Caracterización Resultado Algoritmo*

Información solicitada	Respuesta
Nombres y Apellidos completos	José Guillermo García Herrera
Programa	Especialización en redes NGN
Intereses en ingeniería, tecnología e investigación	Desarrollo de programas de automatización, compatibilidad entre la electrónica, la electricidad y las telecomunicaciones, manejo de datos e información estratégica.
Experiencia en investigación (si/no) ¿cuál?:	Si, sistemas de control y telecontrol aplicados mediante redes NGN
Fortalezas en áreas de ingeniería:	Manejo de herramientas tecnológicas, creatividad y adaptación, actualización y mejoramiento de procesos.
Debilidades en áreas de ingeniería:	Tener que manejar varias disciplinas, manejo de software migrante y programación detallada.

**Tabla 2***Relación de Intereses Investigativos, Líneas y Grupos de Investigación*

Intereses en ingeniería e investigación	Línea de investigación y áreas temáticas	Grupo de investigación
Desarrollo de programas de automatización, Compatibilidad entre la electrónica, la electricidad y las telecomunicaciones	Automatización y herramientas lógicas Infraestructura tecnológica y seguridad en redes	Automatización de procesos en ingeniería Redes, procesos y sistemas industriales de producción.

**Tabla 3***Identificación Estructura de Investigación*

Aspecto del estudio	Datos de estudio
Hipótesis	Hipótesis Nula (H0): La implementación del algoritmo de detección de eventos de regulación primaria de frecuencia mejora la capacidad de respuesta a eventos de frecuencia en sistemas eléctricos y redes NGN. – Hipótesis Alternativa (H1): La implementación del algoritmo de detección de eventos de regulación primaria de frecuencia no mejora significativamente la capacidad de respuesta a eventos de frecuencia en sistemas eléctricos y redes NGN.
Estudios Base	Revisión de literatura sobre algoritmos para la detección de eventos de regulación primaria de frecuencia en sistemas eléctricos. - Análisis de casos de estudio previos en la implementación de algoritmos similares en redes eléctricas. - Evaluación de tecnologías de sensores y sistemas de control remoto disponibles.
Población	Centros de control de generación de energía. - Redes eléctricas interconectadas a nivel nacional.
Muestra	Seleccionar un conjunto representativo de centros de control de generación de energía y redes eléctricas interconectadas para implementar el algoritmo piloto (ENEL Colombia). - Determinar el tamaño de la muestra en función de la representatividad geográfica y tecnológica.
Metodología	Implementación piloto del algoritmo en los sistemas de telecontrol de la muestra seleccionada. - Monitoreo continuo de la frecuencia y registro de eventos durante un período de prueba específico (por ejemplo, 6 meses). - Comparación de los resultados antes y después de la implementación del algoritmo. - Recopilación de datos sobre frecuencia de eventos, tiempos de respuesta y acciones tomadas. - Encuestas y entrevistas a operadores del centro de control y personal

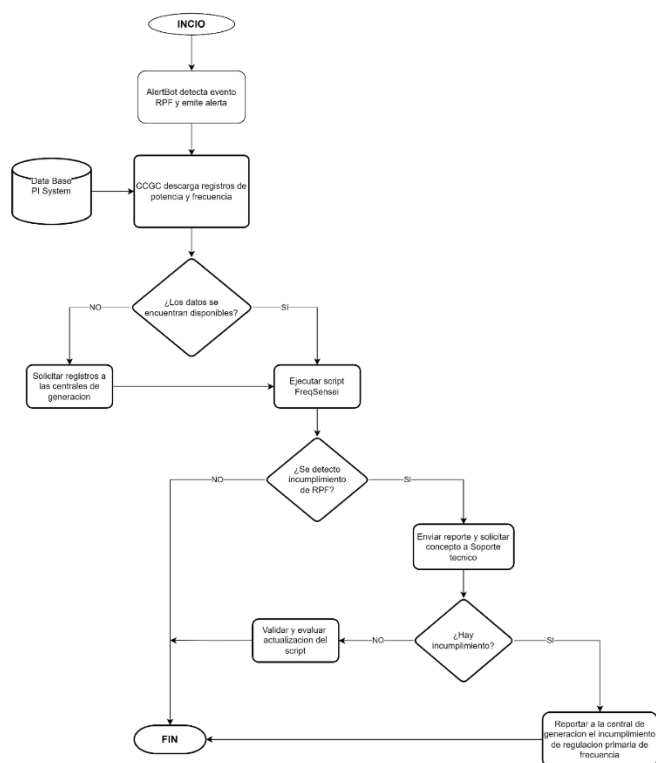
de mantenimiento para evaluar la efectividad y usabilidad del algoritmo.

Áreas de Resultados Eficiencia del algoritmo en la detección de eventos de regulación de frecuencia primaria. Tiempo medio de respuesta a eventos. Mejoras en la estabilidad de la red eléctrica. Satisfacción y percepción de los operadores y personal de mantenimiento. Costes asociados a la implementación y mantenimiento del algoritmo.

Resultados Esperados Mayor detección y respuesta efectiva ante eventos de frecuencia anormal. - Reducción de daños a los equipos y pérdida de energía. Mayor confiabilidad en la red eléctrica. Comentarios positivos de usuarios finales y operadores. Costos justificables de implementación y mantenimiento de mejoras operativas.

**Figura 23**

*Diagrama de Flujo Proceso de Validación Evento RPF*



**Tabla 4***Cronograma de Actividades para el Diseño e Implementación de la Solución*

Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes.6
Revisión de normatividad	X	X				
Análisis de parámetros		X				
Identificación y determinación del proceso			X			
Implementación prueba preliminar de código en Python				X	X	
Secuenciación y prueba macro del código ya ejecutable con script					X	
Prueba de ingeniera código en unidades de generación					X	X
Recopilación, resultados y conclusiones						X

**Tabla 5***Recursos o Presupuesto Para Solución e Implementación*

Recurso	Descripción	Presupuesto
Equipo Humano	Ingeniero electrónico -programador, ingeniero de sistemas y telecomunicaciones supervisor de montaje, tecnólogos y técnicos	15'000.000
Equipos y Software	Algoritmo, de desarrollo estilo script con secuenciador de eventos y registros, hora, potencia y frecuencia.	2'000.000
Viajes y Salidas de Campo	Transporte necesario a centrales, equipos remotos, fronteras y sistemas de comunicación en centrales y centros de procesamiento de datos, levantamiento de información, desplazamiento y traslado.	8'000.000
Materiales y suministros	Software de uso libre, proveedor de eventos y sistemas de información local, regional, central y nacional	5'000.000
Bibliografía	<p>Google Scholar (<a href="https://scholar.google.com">https://scholar.google.com</a>):</p> <p>"Primary Frequency Regulation Detection in Power Plants using SCADA and Digital Tools"</p> <p>"Early Warning Systems for Frequency Events in Power Generation Plants"</p> <p>"Digital Programming and Development in Power Generation Frequency Regulation"</p> <p>"Hydro, Thermal, and Photovoltaic Power Plants Frequency Regulation with SCADA"</p>	N/A
<b>TOTAL</b>		<b>30'000.000</b>

El anterior presupuesto enmarca la fase inicial del proyecto, para la solución de implementación del algoritmo con viabilidad después de pruebas en fase preliminar y piloto de ejecución para su correcto funcionamiento, ya que depende de las nuevas tecnologías, modernización de equipos y aplicación de inteligencias artificiales entre otros.

## Conclusiones

El algoritmo desarrollado permite detectar eventos de regulación primaria de frecuencia y evaluar si cumplen con los parámetros especificados.

Los resultados obtenidos en el ejemplo demuestran que algunos eventos cumplen con los parámetros, mientras que otros no. Esto proporciona información importante para el monitoreo y la gestión del sistema eléctrico.

Los comentarios recopilados de los usuarios finales y de los operadores del sistema eléctrico y agentes generadores han sido positivos. Ya que los operadores aprecian la eficacia del sistema de telecontrol y la utilidad del algoritmo en la toma de decisiones.

El algoritmo propuesto es una solución eficiente para el problema de detección de eventos de regulación primaria de frecuencia, y puede adaptarse a sistemas eléctricos de diferentes escalas.

El costo y el cronograma variarán según las necesidades específicas del proyecto, ya que se puede evidenciar mejoras en el proceso de prueba piloto e implementación.

El código tuvo modificación en 3 ocasiones llegando a la versión 2.0, la cual resultó ser de mejor funcionamiento en el proceso adaptativo del mismo y los resultados emitidos en tiempo real, obtenidos con mejor eficiencia y veracidad.

## Referencias

- A. Levy, D. M. (2021). *“Definiciones del sector eléctrico para la incorporación de las energías renovables variables y la integración regional en América Latina y el Caribe.* Obtenido de (CEPAL): <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/46120321-fd1d-4b75-a24a-b3b92c7e880b/content>
- Alberto, L. d., Apodaca-Zamora Federico, & Hugo, O.-M. V. (2018). *Implementación de un sistema de monitoreo de área amplia a escala de laboratorio para sistemas eléctricos de potencia.* Obtenido de Ingeniería, investigación y tecnología, vol. XIX, núm. 2: <https://www.redalyc.org/journal/404/40458281007/>
- Chamba, S. V. (2022). *Regulación Primaria de Frecuencia Mediante Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano.* Obtenido de Revista Técnica "energía", 19(1), PP. 13–21.: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.506>
- Ecasam. (2021). Obtenido de <https://ecasam.com/category/ecasam>
- El-Proceso-de-Liberalizacion-de-los-Sectores-Energeticos. (s.f.). *Energía y Sociedad.* Obtenido de <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/1-5-el-proceso-de-liberalizacion-de-los-sectores-energeticos/>.
- Expósito, A. A. (2004). *"Estimación del estado del sistema eléctrico: teoría e implementación".* <https://energy5.com/es/el-impacto-de-la-desregulacion-en-los-mercados-electricos>. (s.f.). *El-Impacto-de-la-Desregulación-en-los-Mercados-eléctricos.* Obtenido de <https://energy5.com/es/el-impacto-de-la-desregulacion-en-los-mercados-electricos>
- Liberalización de los Mercados Eléctricos: factores, b. r. (2018). *PUCE.* Obtenido de Centro de Educación Virtual ([puce.edu.ec](http://puce.edu.ec)): ([puce.edu.ec](http://puce.edu.ec))

- Manuel, Q.-C., Patricio, P. B., Javier, M.-C., & al, e. (2020). *Desarrollo y evaluación de un gateway móvil IoT para redes 4G LTE. Enfoque UTE*, 2020,11(4). Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5722/572264291002/>
- Markets.", ". I. (2008). *The Economic Journa*. 348-368.
- MEG. (2020). *¿Qué es y cómo funciona una línea de transmisión eléctrica?* Obtenido de <https://montegar.es/lineas-de-transmision-electrica/>
- Nagrat, D. K. (2002). *"Análisis del sistema eléctrico moderno"*.
- Pedro Linares, C. V. (2015). *Instituto de Investigación Tecnológica*. Obtenido de <https://pascua.iit.comillas.edu/pedrol/documents/econext03.pdf>
- Piattini Velthuis, M. G. (2018). *Calidad de datos.Madrid: RA-MA Editorial.. eBook. Language*. Obtenido de <https://www.casadellibro.com/libro-calidad-de-datos/9788499647500/6865540>
- Rodríguez Sote, J. L. (2017). *Sistema de monitoreo y control remoto usando IOT para un regulador de presión*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84955649011>
- Velasco-Ramírez, E. Á.-C.-M. ((s. f.). *Redes de transmisión inteligente. Beneficios y riesgos. Ingeniería Investigación y Tecnología*. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(13\)72227-3](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(13)72227-3)
- Ventajas-e-Inconvenientes-de-la-Liberalizacion-del-Mercado-Energetico-de-la-UE. (s.f.). Obtenido de [ventajas-e-inconvenientes-de-la-liberalizacion-del-mercado-energetico-de-la-ue](https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84955649011)