



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE BATERÍAS INERCIALES  
(FLYWHEELS ENERGY STORAGE) COMO SISTEMA DE REGULACIÓN  
PRIMARIA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA “LA ESPERANZA”,  
INTIBUCÁ, HONDURAS**

**PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO**

**INGENIERO EN ENERGÍA**

**PRESENTADO POR:**

**21751059 - JOSÉ ISMAEL MEJÍA LAINEZ**

**ASESOR: PH.D. HÉCTOR VILLATORO**

**CAMPUS SAN PEDRO SULA; ABRIL, 2021**

## **DEDICATORIA**

Esta investigación está dedicada a Dios en primer lugar, ya que fue quien me permitió mantenerme firme y me dio fuerzas para continuar a pesar de las vicisitudes, a mi madre y mi padre que son pieza fundamental en mi desarrollo como profesional y como persona, fueron los instrumentos que Dios utilizó para que pudiera seguir. Dedicado a mis hermanos que siempre me dieron ánimos y creyeron en mí, el doctor Héctor Villatoro que desde clases anteriores vio mi potencial y siempre me lo recuerda, a la ingeniera Alicia Reyes que me recuerda que le eche ganas. Dedicado también a cada joven que es curioso, que no se queda con lo que le proporcionan, sino que va más allá en busca de mejorar y contribuir al conocimiento científico de nuestro país.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradecer a Dios por darme la oportunidad y el privilegio de poder llegar hasta esta instancia, Él me sostuvo y me dio las herramientas, el talento, las ganas, todo para que pudiera caminar en este camino y no puedo estar más agradecido por la bendición de poder culminar con éxito esta etapa.

También agradecer a mis padres que fueron los que me tuvieron paciencia, me cuidaron en todo el proceso y se aseguraron siempre dentro de sus posibilidades de entregarme todo lo que necesitaba, los amo y estoy eternamente agradecido con ellos por ser tan maravillosos conmigo.

Agradezco el apoyo de mis hermanos por creer en mí, por apoyarme, motivarme y siempre estar ahí cuando los necesitaba, cuando tenía algún problema ellos estaban ahí. También a mi mejor amiga, sin duda alguien que estuvo ahí, que me empujó, que me inquietó para que trabajara y entregara el 100%, ayuda idónea, gracias por soportarme.

A su vez agradecer a el doctor Héctor Villatoro por creer y apoyarme, por mantener la presión hasta sacar todo de mi potencial. A la ingeniera Alicia Reyes por su apoyo, comentarios, sugerencias, llamadas de atención y su presión a sacar todo lo que puedo llegar a hacer.

A mis compañeros que en cualquier problema ellos respondieron y alentaban en los momentos difíciles, a Fernando Josué Vásquez de EEH que nos facilitó los datos que se utilizaron en el análisis.

Agradezco a todos los que me apoyaron y creyeron en mí, toda la gloria y honra sea para Dios, sin Él nada fuera posible.

## RESUMEN EJECUTIVO

La generación de energía eléctrica en Honduras es diversa ya que en este sector participan 7 tipos de tecnologías de generación, pero la que mayor participación tiene es la térmica con un 30.9% seguida de la hidroeléctrica con un 29.7%, esto debido a que las centrales termoeléctricas funcionan como potencia base que ayuda a la estabilidad del sistema interconectado nacional. La energía eléctrica es un servicio que debe de estar a la disposición del cliente de manera inmediata, es por esto por lo que la oferta siempre debe de ser igual a la demanda, y dentro de esta dinámica se encuentran perturbaciones como los cambios abruptos de potencia ya sea por un incremento en la demanda o en la pérdida de un generador, para mantener la estabilidad ante estas perturbaciones se tiene un sistema de regulación primaria que suple la potencia demandada por la red en ese instante, permitiendo que la oferta se iguale con la demanda. En este sistema son fuentes no renovables las que suplen de potencia inmediata a la red. En esta investigación se implementó las baterías inerciales como alternativa renovable en la regulación primaria de la energía, se obtuvo el perfil de demanda de la subestación de Comayagua que conecta con la hidroeléctrica "La Esperanza" ubicada en Intibucá. Con los datos proporcionados de la subestación se filtraron los mayores cambios de potencia que se presentaron en cada hora del día del año 2019 y 2020. Para evaluar la implementación de las baterías se simuló los cambios abruptos de potencia, estos cambios de demanda fueron suplidos por las baterías inerciales y el generador diésel, en MATHLAB/Simulink se hizo un análisis transitorio de modalidad isla y aumento de potencia abrupto con diferentes diferenciales de potencia, para esto se necesitó una carga variable que simulara estos cambios de demanda e interconectados con la hidroeléctrica, el generador y las baterías inerciales.

**Palabras clave:** batería inercial, demanda eléctrica, regulación primaria, simulación.

## ABSTRACT

Electricity generation in Honduras is diverse since 7 types of generation technologies participate in this sector, but the one with the highest participation is thermal with 30.9% followed by hydroelectric with 29.7%, this because the power plants Thermoelectric plants function as base power that helps the stability of the national interconnected system. Electric power is a service that must be available to the customer immediately, this is why the supply must always be equal to the demand, and within this dynamic there are disturbances such as abrupt changes in power either due to an increase in demand or the loss of a generator, to maintain stability in the face of these disturbances there is a primary regulation system that supplies the power demanded by the network at that moment, allowing the supply to be equal to the demand. In this system, non-renewable sources are those that supply immediate power to the grid. In this research, inertial batteries were implemented as a renewable alternative in the primary regulation of energy, the demand profile of the Comayagua substation that connects with the "La Esperanza" hydroelectric plant located in Intibucá was obtained. With the data provided by the substation, the largest changes in power that occurred in each hour of the day in 2019 and 2020 were filtered. To evaluate the implementation of the batteries, abrupt changes in power were simulated, these changes in demand were supplied by the inertial batteries and the diesel generator, in MATHLAB / Simulink a transient analysis of island mode and abrupt power increase with different power differentials was carried out, for this a variable load was needed to simulate these demand changes and interconnected with the hydroelectric, generator and inertial batteries.

**Key words:** *inertial battery, electrical demand, primary regulation, simulation.*

# ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
2.1	PRECEDENTES DEL PROBLEMA.....	3
2.2	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	4
2.3	JUSTIFICACIÓN.....	4
2.4	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	5
2.5	OBJETIVOS.....	5
2.5.1	OBJETIVO GENERAL.....	5
2.5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
III.	MARCO TEÓRICO.....	7
3.1	Energía.....	7
3.1.1	Energía eléctrica.....	8
3.2	Generación de energía eléctrica.....	10
3.2.1	No renovables.....	10
3.2.2	Renovables.....	10
3.3	Inducción electromagnética.....	12
3.4	Energía hidráulica.....	14
3.5	Sistema de regulación primaria de la energía.....	15
3.6	Marco legal.....	15
3.7	Almacenamiento de la energía.....	16
3.7.1	Baterías inerciales.....	16
IV.	METODOLOGÍA.....	18

4.1	ENFOQUE.....	18
4.2	VARIABLES DE INVESTIGACIÓN.....	18
4.2.1	VARIABLES INDEPENDIENTES.....	19
4.2.2	Variables dependientes.....	19
4.3	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS.....	20
4.3.1	MATLAB/Simulink.....	20
4.3.2	Microsoft Office 365 Excel.....	20
4.4	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	20
4.5	METODOLOGÍA DE ESTUDIO.....	20
4.5.1	Adquirir perfil de demanda eléctrica de la subestación CYG.....	21
4.5.2	Determinar las potencias máximas demandadas.....	22
4.5.3	Determinar las diferencias de potencia más significativos.....	23
4.5.4	Modelar el sistema en MATLab/Simulink.....	24
4.5.5	Estimar la potencia nominal de las baterías inerciales.....	29
4.5.6	Analizar el comportamiento del sistema previo y posterior a la instalación.....	30
4.6	METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.7	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	30
V.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	32
5.1	Resultados del Perfil 1.....	33
5.1.1	Frecuencia.....	33
5.1.2	Generador diésel.....	34
5.1.3	Hidroeléctrica.....	35
5.1.4	Baterías inerciales.....	36

5.1	Resultados del Perfil 5.....	36
5.1.1	Frecuencia.....	37
5.1.2	Generador diésel.....	38
5.1.3	Hidroeléctrica.....	38
5.1.4	Baterías inerciales.....	39
VI.	CONCLUSIONES.....	41
VII.	RECOMENDACIONES.....	43

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Oferta de recursos energéticos primarios en Honduras (SEN, 2019).....	8
Ilustración 2: Porcentaje de generación de energía eléctrica por recurso primario (BP, 2020) .....	11
Ilustración 3: SICA: principales adiciones de capacidad en 2018 [MW] (CEPAL, 2018) .....	12
Ilustración 4: Inducción electromagnética (Zemansky, 2018) .....	13
Ilustración 5: Tiempo de reacción por cada sistema de regulación (Red Eléctrica de España, 2021) .....	15
Ilustración 6: Costo nivelado de almacenamiento [US\$ / MWh] (Schmidt et al., 2019).....	17
Ilustración 7: Variables de investigación .....	19
Ilustración 8: Metodología de estudio .....	21
Ilustración 9: Diagrama en MATLAB/Simulink.....	27
Ilustración 10: Diagrama del generador en MATLAB/Simulink.....	28
Ilustración 11: Diagrama de la central hidroeléctrica en MATLAB/Simulink.....	29
Ilustración 12: Esquema general.....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetro de entrada del generador diésel.....	27
Tabla 2: Parámetros para la central hidroeléctrica .....	28

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Fuerza electromotriz .....	13
Ecuación 2: Flujo magnético .....	13

Ecuación 3: Fuerza electromagnética inducida..... 14

## ÍNDICE DE GRÁFICO

Gráfico 1: Índice de acceso a la electricidad por países de altos, medianos y bajos ingresos (Banco Mundial, 2019) ..... 9

Gráfico 2: Perfil de demanda eléctrica máxima y promedio diario en la subestación CYG (EEH, 2019) ..... 22

Gráfico 3: Demanda máxima por hora ..... 23

Gráfico 4: Mayores diferencias de potencia demandada..... 24

Gráfico 5: Perfiles de demanda con sus potencias máximas y promedio. (Elaboración propia) ... 32

Gráfico 6: Perfiles de carga que se simularon como carga variable (Elaboración propia) ..... 33

Gráfico 7: Valor de la frecuencia en la simulación..... 34

Gráfico 8: Perfil de generación de generador diésel ..... 34

Gráfico 9: Perfil de generación de hidroeléctrica..... 35

Gráfico 10: Perfil de generación de baterías inerciales y porcentaje de carga..... 36

Gráfico 7: Valor de la frecuencia en la simulación..... 37

Gráfico 8: Perfil de generación de generador diésel ..... 38

Gráfico 9: Perfil de generación de hidroeléctrica..... 39

Gráfico 10: Perfil de generación de baterías inerciales y porcentaje de carga..... 39

# GLOSARIO

## I. INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica ha estado encabezada por fuentes de energía no renovables y contaminantes ya que un 72% de la energía eléctrica es producida por este tipo de fuente (OLADE, 2021), el crecimiento de las energías renovables como la solar, eólica, hidráulica y geotérmica en los últimos años es evidente, como por ejemplo la energía solar, pasó en 10 años de tener una potencia instalada de 43GW a nivel mundial a tener 651GW (EPIA, 2021). Sin embargo, siempre existe una dependencia de las energías no renovables, las energías renovables solo generan el 38% de la energía eléctrica mundial. Puesto que la energía eléctrica es un servicio público y que tiene como característica que la demanda debe ser igual a la oferta, ya que se debe suplir la potencia demandada por el sistema eléctrico de potencia de manera inmediata y de esta forma mantener estable la misma. Dentro de esta dinámica entre oferta y demanda existen perturbaciones que crean inestabilidad en la red y es por lo que existe un sistema especial que mantiene estable la frecuencia, el voltaje y el ángulo de fase. Este sistema está conformado por fuentes de energía no renovables que disponen de potencia de manera inmediata y dan estabilidad al sistema mientras otras fuentes de generación como la hidroeléctrica se adaptan al cambio de la demanda. Este sistema de regulación se divide según el tiempo de respuesta que tiene a un cambio en la red, y el que se encarga de regular la frecuencia y el voltaje es el sistema de regulación primaria que normalmente son centrales termoeléctricas que están a un factor de planta bajo que permite incrementar la potencia generada inmediatamente y generadores diésel que también funcionan como regulación primaria en redes con menores picos de demanda.

Para optimizar la generación de energía por fuentes renovables y disminuir la variabilidad en su generación, se han creado sistemas de almacenamiento de energía que permiten entregar potencia de manera estable y ampliar el rango de horas de generación, ya que las energías renovables como la solar y eólica tienen horas en las cuales la generación de energía es despreciable y se requiere otra fuente de generación que supla la demanda en estas horas. El inconveniente de los sistemas de almacenamiento es su alto costo para sistemas de potencia significativos que, haciendo poco viable su implementación a gran escala.

Algunas investigaciones similares a esta son las siguientes. Leclercq et al. (2003) desarrollaron un estudio sobre el control con lógica difusa de las baterías inerciales asociado a generadores eólicos y diésel. Indagando en este sentido Su et al. (2010) desarrollaron un modelo en MATLAB una batería inercial como un sistema de almacenamiento de energía de corta duración. Para una aplicación práctica Arghandeh et al. (2012) realizaron un estudio de la aplicación de las baterías inerciales como sistema de almacenamiento en cargas críticas durante cortes de energía de una microrred simulando la carga que representa un data center para analizar la respuesta de las baterías inerciales. Sebastián y Peña-Alzola (2015) simularon el sistema de control de las baterías inerciales en una microrred donde se combinaba un generador diésel y un aerogenerador, utilizando las baterías inerciales para obtener la máxima contribución de energía del aerogenerador.

En esta investigación se evaluará la implementación de las baterías inerciales, que almacenan la energía cinética haciendo girar un volante conectado a un generador asíncrono, este sistema de almacenamiento permite mantener la estabilidad de frecuencia en la red al disponer potencia de manera inmediata cuando se presenten cambios en la demanda. Esto como alternativa a un generador diésel para la regulación primaria de la energía y disminuir el consumo de combustibles fósiles. Esta evaluación se hará tomando como entrada el perfil de demanda de energía eléctrica de la subestación de Comayagua, en la salida de la hidroeléctrica "La Esperanza" ubicada en Intibucá, específicamente el perfil de demanda de la línea L-317 donde interconecta la central con la subestación.

Esta investigación se desarrollará en cuatro capítulos los cuales se dividirán de la siguiente manera: en el capítulo I se plantea la problemática de investigación, sus antecedentes, la definición y justificación del problema, también se presentan las preguntas de investigación. Teniendo definido la problemática se procederá a presentar el objetivo general y los objetivos específicos. En el capítulo II se mostrará el marco teórico que amplía los principales temas que dan soporte a la investigación, posteriormente en el capítulo III se aborda la metodología a utilizar, el enfoque, alcance y metodología de estudio a seguir para lograr llegar a los resultados y posterior análisis de los mismos. Y en el capítulo IV se abordarán las conclusiones y recomendaciones con base a los resultados obtenidos.

## **II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la siguiente sección se estará abordado y aclarando el planteamiento del problema de la investigación y los precedentes, a su vez se presenta la justificación y la propuesta para resolver la problemática. Así mismo se presenta los objetivos tanto general como específicos del proyecto.

### **2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA**

En el siglo XIX con el surgimiento de la generación de la energía eléctrica y combustibles fósiles que podrían ser almacenados y posteriormente utilizados en el proceso de combustión para el aprovechamiento de su potencial calorífico en la generación de energía eléctrica supuso un gran avance en la industria ya que se podía suplir una demanda de energía de manera estable por grandes lapsos de tiempo (Guilherme de Oliveira e Silva, Patrick Hendrick, 2016). Pero con el impacto que estas tecnologías tuvieron y siguen teniendo surgieron nuevas formas de generación y posteriormente almacenamiento que no eran contaminantes al ambiente y ayudaría a frenar el cambio climático. Estas tecnologías como la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica, entre otras, vinieron a solucionar este problema, pero las termoeléctricas a base de combustibles fósiles siguieron teniendo una gran influencia en la matriz energética mundial, esto debido a que las energías renovables tiene un problema, no son irregulares, por lo que para proveer a la demanda una potencia estable es necesario una tecnología base que de soporte a la red y proporcione un buen servicio en todas las áreas, tanto voltaje como frecuencia. El comportamiento de la demanda puede ser variado y tener diferencias de potencia altas que inestabilizan y alteran la frecuencia de la red. Es por esto que se necesita un sistema de regulación que mantenga la red estable y eficiente, este se divide en tres, pero en el que existe una gran deficiencia por parte de las energías renovables es en el sistema regulación primaria ya que en este se necesita una respuesta inmediata al cambio de potencia en la demanda para que la frecuencia se estabilice y el voltaje se mantenga en un valor nominal aceptable, y como las energías renovables tienen un recurso primario que no se puede reservar y por consiguiente no se puede disponer más de este recurso de manera inmediata, es necesario contar con generadores Diesel u otra tecnología no renovable que disponga de su recurso cuando se necesite.

En Honduras la matriz de generación de energía eléctrica se observa en el Boletín Estadístico (2021) que un 34.6% de la potencia instalada es no renovable y que el 40% de la energía fue generada por estas mismas, a pesar del alto porcentaje de las energías renovables, en términos generales la energía térmica es la que predomina en el país.

En la zona donde se encuentra la presa hidroeléctrica "La Esperanza" en la ciudad de La Esperanza Intibucá, se tiene una red con ciertos cambios de potencia, esto se verá afectado aún más con Plan de Expansión de la Red de Transmisión del Sistema Interconectado Nacional elaborado por el ODS (2019), ya que planea conectar los departamentos de La Paz e Intibucá con futuras subestación en dichos departamentos.

## **2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

La regulación primaria de la energía ha sido un tema de mucho interés y desafío para las energías renovables, ya que debido a que las energías como la eólica, solar y hídrica, presentan grandes problemas de inestabilidad, basta con ver las gráficas de generación de las primeras dos tecnologías para identificar esta problemática. Esto añadido a los altos precios de las tecnologías de almacenamiento de energía, no son consideradas para regulación primaria en la red haciendo necesarias las termoeléctricas con combustibles fósiles. Añadido al comportamiento inestable de la red en La Esperanza y los futuros planes de expansión de la red de transmisión, se demandará con bastante frecuencia la regulación primaria de la energía.

## **2.3 JUSTIFICACIÓN**

La energía eléctrica es un servicio en el cual se precisa que la energía demandada sea suplida por la oferta del sistema de manera inmediata, segura y confiable. Esto afecta a la generación de energía, ya que debe responder a los cambios bruscos en la demanda, y la generación por energías renovables carece de la disposición de su recurso primario de manera inmediata, lo que requiere de una reserva de potencia en tecnologías no renovables y contaminantes. Con la implementación de las baterías inerciales (FES) aportarían potencia al sistema de regulación primaria, reduciendo así, en primer lugar, el uso de generadores con combustibles fósiles, la emisión de gases de efecto invernadero, y manteniendo una matriz energética que avance en pro

del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7 de la ONU "Asegurar un acceso económico, confiable, sostenible y moderno a la energía para todos" para el 2030, y específicamente en la meta 2:

*"Incrementar sustancialmente la proporción de energía renovable en la matriz energética global al 2030" (ONU, 2016)*

Esto impacta en todas las ramas del sector eléctrico, y al tener baterías inerciales que no son contaminantes, tienen una larga vida útil y son seguras por su aislamiento en vacío, aportan a la disminución de la inestabilidad del sistema y la reducción de uso de energías no renovables como bases para la regulación, también optimizando el rendimiento de las energías renovables como la solar, eólica e hidráulica de las cuales existe un gran potencial energético en el territorio hondureño.

## **2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

1. ¿Cuál es el perfil diario de la demanda en la central hidroeléctrica "La Esperanza"?
2. ¿Cuáles son las horas pico y valle de la demanda?
3. ¿Cuál es la potencia nominal demandada del sistema?
4. ¿Cómo sería el perfil de demanda de un sistema de regulación primaria?
5. ¿Cuánta energía es almacenada por las baterías inerciales?
6. ¿Es suficiente el tiempo de descarga de las baterías inerciales?
7. ¿Qué sistema de regulación primaria es la más viable técnicamente?

## **2.5 OBJETIVOS**

### **2.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar el cambio en el comportamiento de la respuesta de regulación primaria en el sector de La Esperanza, Intibucá, con la implementación de baterías inerciales en las instalaciones de la central hidroeléctrica "La Esperanza", y comparar el escenario antes y después de la implementación mediante una simulación, analizando sus beneficios económicos y técnicos.

## 2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar los perfiles de demanda y generación de la central hidroeléctrica y modelar un comportamiento típico en la salida de la central durante el día.
2. Determinar los picos de potencia y las horas valle de la red.
3. Simular el comportamiento de un sistema de regulación primaria en el momento que presente inestabilidad en su frecuencia debido a un cambio en la demanda.
4. Determinar el almacenamiento de energía de las baterías inerciales.

### **III. MARCO TEÓRICO**

A continuación, se abordarán los temas de mayor relevancia para que se puede tener una idea clara de cada uno de ellos. Es importante conocer cómo se genera la energía eléctrica y sus diferentes tecnologías, a su vez es necesario clasificar la diferentes tipos de energías y sus características. También es relevante describir con claridad el funcionamiento de las fuentes de almacenamiento de energía y cuál ha sido su comportamiento a lo largo de los años. Así mismo es fundamental para el desarrollo de la investigación ampliar la definición de regulación primaria y cuál es su participación en los sistemas de potencia como el de Honduras y específicamente en la zona occidental del país.

#### **3.1 Energía**

La energía como tal tiene muchas definiciones, para la física es la capacidad de realizar un trabajo (De & Ciencias, 1994, p.5), este puede realizarse de diversas formas, conocemos muchas formas de realizar trabajo, la energía cinética, que es el trabajo realizado al moverse un objeto, la energía potencial, que es el trabajo que se realiza cuando se cambia de altura un objeto. Algo particular de la energía es que se puede transformar de un tipo a otro, por ejemplo, se puede convertir la energía cinética en energía potencial si un auto sube una colina y se detiene en su punto máximo, la energía cinética con la cual se movía el auto se fue transformando en energía potencial a medida iba subiendo la colina, hasta llegar a la cumbre donde toda la energía cinética se convirtió en energía potencial. La transformación es un factor clave para el desarrollo de la humanidad, el ser humano transforma la energía calorífica de los alimentos en movimiento al caminar y correr, o en procesos químicos como la oxigenación de la sangre y la liberación de hormonas y activación de neuro receptores que se ven involucrados en el desarrollo de ideas y emociones.

También en un sentido más amplio, el desarrollo como sociedad se ve beneficiada por la energía, tales como la energía térmica para la cocción de los alimentos, el almacenamiento de la energía potencial del agua para convertirla en energía cinética y regar los campos también beneficiaron al desarrollo integral de la humanidad, es por eso que después de la revolución industrial con el carbón como fuente de energía primaria, que la transformación de la energía obtuvo un papel protagónico, ya que al transformar el potencial calorífico del carbón en energía térmica y transferir

esa energía térmica al agua para que se convirtiera en vapor para impulsar un pistón que transformaría esa energía cinética que provoca el cambio de fase a energía mecánica para mover una locomotora de vapor (Zemansky & Freedman, 2013, p. 624). Posteriormente en el siglo XVII comenzó el interés por una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, la fuerza electromagnética.



Ilustración 1: Oferta de recursos energéticos primarios en Honduras (SEN, 2019)

En Honduras la oferta de energía tiene como base la leña como recurso primario, esto se debe al gran número de pueblos, aldeas y caseríos que utilizan sistemas de cocción de alimentos a base de leña como lo son los fogones y las hornillas que son habituales en las zonas rurales del país. Añadiendo también que en las zonas urbanas también se utiliza la leña para este mismo fin, pero con menor frecuencia y volumen ya que son en parrillas y otros eventos especiales en las cuales se usa y no en todos los sistemas de cocción domésticos.

### 3.1.1 Energía eléctrica

La energía eléctrica se puede obtener mediante la transformación de la energía cinética o mecánica y luego mediante un principio electromagnético, transformarlo en energía eléctrica que es la que se usa para alimentar a todos los aparatos que necesitamos hoy en día, tiene como principio la fuerza electromagnética. A lo largo de los años se fue ampliando la aplicación del flujo

de electrones por un conductor y pasar de un experimento como el del físico francés Charles Coulomb corroborando las fuerzas existentes y no visibles entre cargas regida por la polaridad de dichas cargas, a pasar por el descubrimiento del físico británico Miguel Faraday que probó el comportamiento de los electrones en un conductor cuando este se ve afectado por un imán, generando así un flujo de electrones en el conductor.

Llegando a uno de los inventos que puso un antes y un después a la historia de la humanidad, el generador eléctrico, es mediante este modelo desarrollado por el estadounidense Thomas Alba Edison, con los principios de Faraday y Amper, que la energía eléctrica pasa de ser un experimento a un servicio. En los años siguiente Edison siguió desarrollando inventos para aprovechar esta energía. Posteriormente se convertiría en un servicio básico para la población, también se desarrollaron múltiples formas de generación de energía eléctrica.

Un aspecto para destacar de la energía eléctrica es su importancia en la economía de un país, ya que es un servicio básico al cual toda persona debe de tener acceso. El índice de cobertura y acceso a la electricidad refleja un enorme desarrollo económico, entre más se acerca a un 100% de cobertura mayor es el desarrollo que el país presenta.

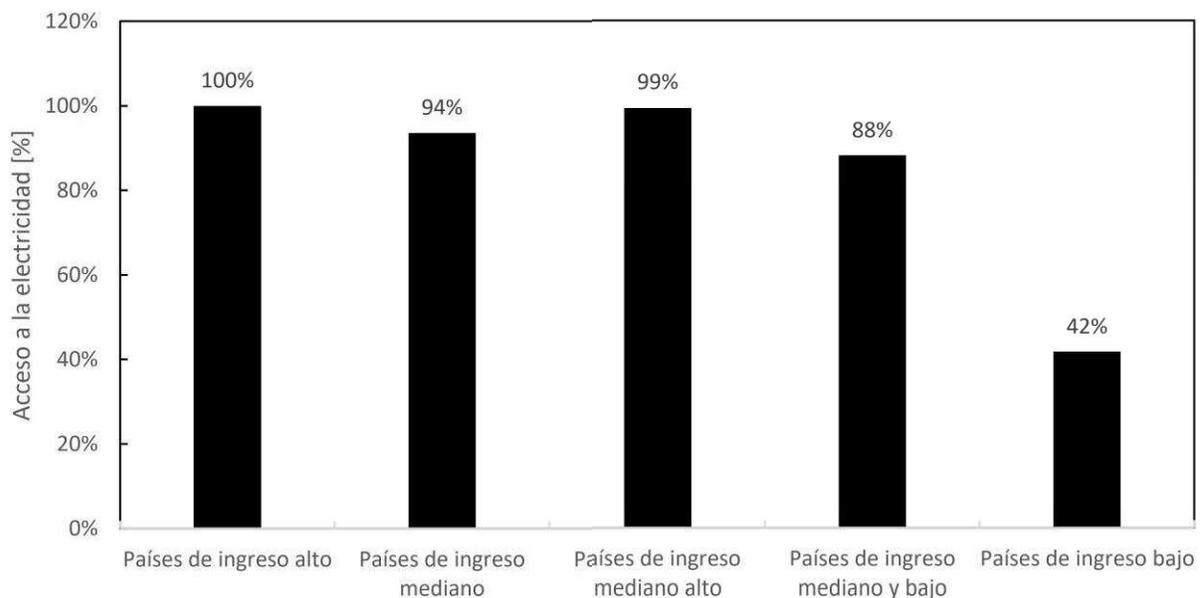


Gráfico 1: Índice de acceso a la electricidad por países de altos, medianos y bajos ingresos

(Banco Mundial, 2019)

En Honduras aproximadamente en un 85.02% del territorio hay cobertura de la electricidad y un 87.97% de la población tiene acceso a la electricidad (SEN, 2019), ubicándose entre los países de ingreso medio y bajo. Se aprecia el impacto que tiene la energía eléctrica en los ingresos de un país, entre mayor electrificación y confiabilidad en el sistema, mayor será el desarrollo económico del país.

### **3.2 Generación de energía eléctrica**

La generación de energía eléctrica ha cambiado a lo largo de los años, pero especialmente en la última década, y cada vez tiene mayor injerencia en la economía de los países tomando un papel trascendental en el desarrollo de las naciones. Esta generación de energía la podemos clasificar por su recurso primario en dos, energías renovables y no renovables.

#### **3.2.1 No renovables**

La energía no renovable es aquella cuya materia prima es limitada y no se puede volver a generar en la naturaleza en un tiempo razonable, y en algunas tecnologías son contaminantes ya que emiten gases de efecto invernadero (GEI), al año 23,626 kilotoneladas de CO<sub>2</sub> (Muntean, M., Guizzardi, D., Schaaf, E., Crippa, M., Solazzo, E., Olivier, J.G.J., Vignati, E., 2018) son liberados por la industria eléctrica alrededor del mundo en la actualidad. Lo que sostiene este tipo de plantas de generación es la abundancia de reservas de petróleo y de uranio en el mundo, además de su confiabilidad y su fácil implementación, en termoeléctricas de combustibles fósiles, ya que tienen muchos avances en eficiencia por su larga trayectoria en la industrial.

#### **3.2.2 Renovables**

Este tipo de energía está caracterizado por que sus recursos primarios son generados cíclicamente por la naturaleza, siempre respetando el tiempo de regeneración del recurso. Tales recursos como el sol, el viento, el agua de los ríos y recurso geotérmico son las principales fuentes de energía para este tipo de generadores de energía. En los últimos años, estimulado por la necesidad de reducir la generación de GEI y lograr disminuir la curva de calentamiento global y la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmosfera, es claro que estas tecnologías se han ido optimizando cada vez para para lograr sustituir a las fuentes no renovable.

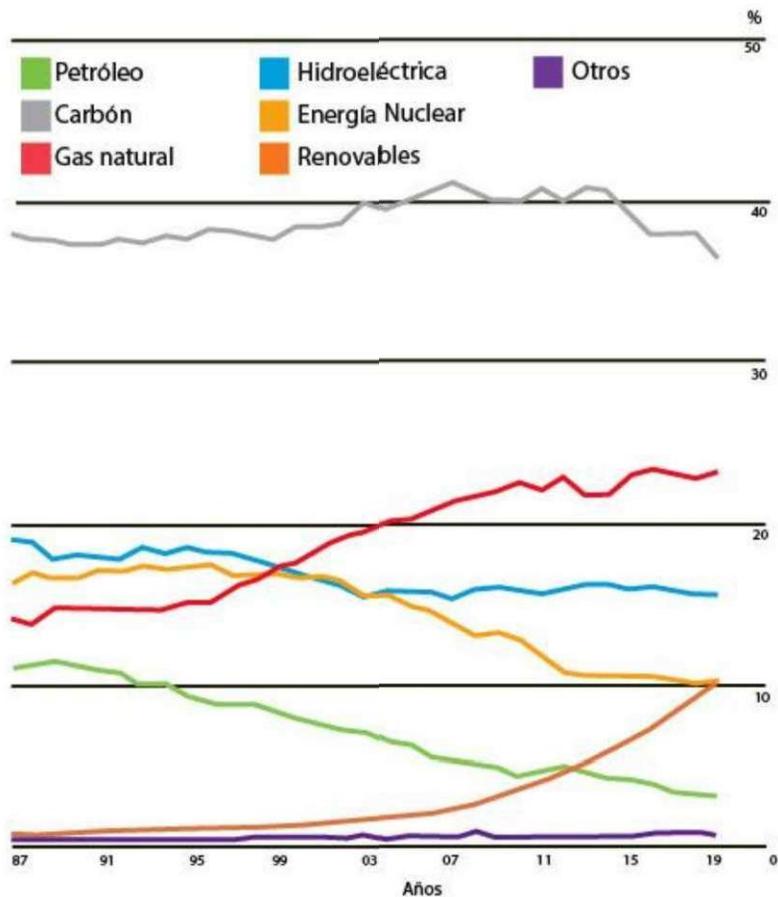


Ilustración 2: Porcentaje de generación de energía eléctrica por recurso primario (BP, 2020)

En el gráfico claramente se puede observar que el carbón, el petróleo y la energía nuclear, que son energías no renovables, han disminuido su participación en la generación de energía eléctrica y también una gran alza en la generación mediante energías renovables en general y la energía hidroeléctrica, reduciendo las emisiones de GEI considerablemente.

En Honduras se puede encontrar un comportamiento similar con respecto a la matriz de generación de energía eléctrica, en los últimos años las energías renovables han aumentado, esto debido al apoyo de los incentivos aprobados en los decretos No. 70-2007 y No. 404-2013, que impulsan el desarrollo de las energías renovables exonerándolas de impuestos y priorizando su despacho. Solo entre 2014 y 2015 la potencia instalada de las energías renovables aumentó un 54.4% y pasó de representar el 48.4% al 59.2% de la potencia instalada neta del país, en total fueron 500MW los que se instaló entre estos dos años.

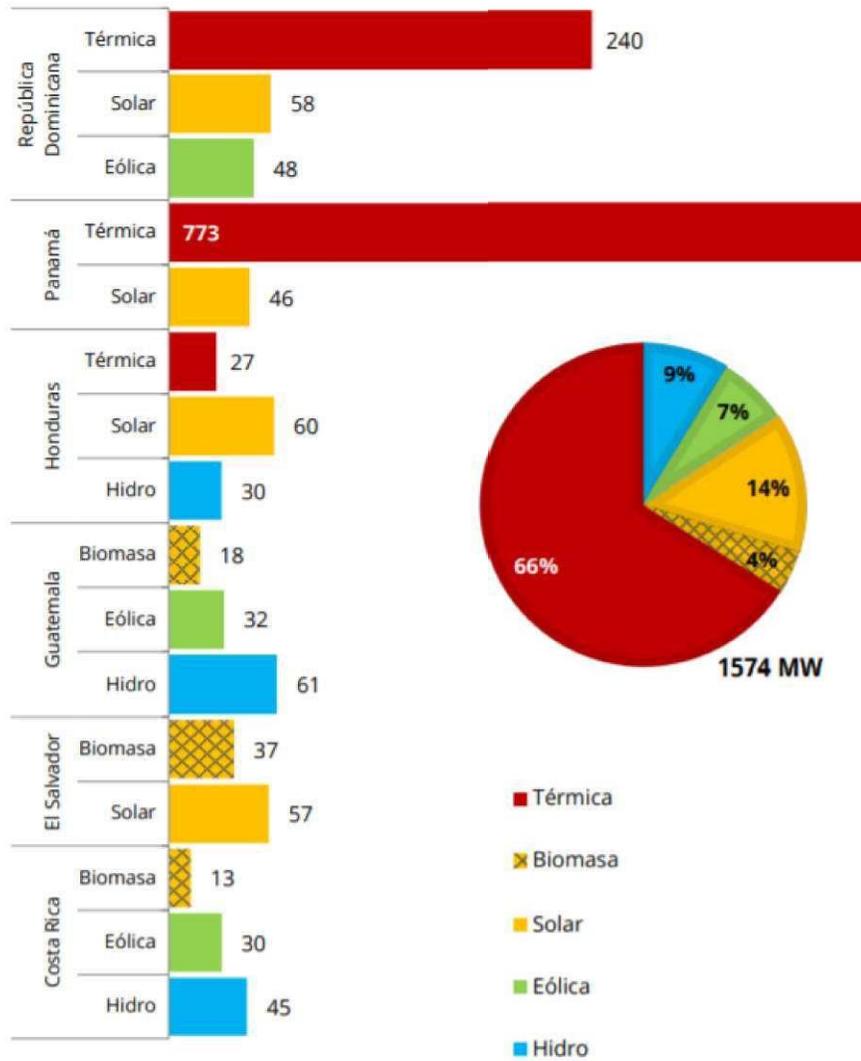


Ilustración 3: SICA: principales adiciones de capacidad en 2018 [MW] (CEPAL, 2018)

Se observa que en el 2018 existe una gran participación de potencia instalada pertenecientes a energías renovables, esto cada año va incrementando, dando como resultado una matriz variada y precios competitivos.

### 3.3 Inducción electromagnética

La inducción electromagnética se deriva de la fuerza electromagnética que una de las fuerzas fundamentales del universo. La inducción ocurre cuando se produce un fenómeno a distancia sin que exista contacto entre ambos cuerpos o materiales (RAE, 2020). Y se conoce como inducción electromagnética cuando se produce electricidad a partir del efecto de un campo magnético

variable. Es en este principio donde descansa el fundamento de la generación de la energía, ya que una corriente tiene un campo magnético asociado que esta presente de forma solenoidal alrededor del conductor por donde viaja la corriente.

$$\varepsilon = - \frac{d\theta}{dt}$$

Ecuación 1: Fuerza electromotriz

Donde:

- $\varepsilon$  = Fuerza electromotriz [V]
- $d\theta$  = Derivada del flujo magnético
- $dt$  = Derivada del tiempo

$$\theta = BxS$$

Ecuación 2: Flujo magnético

Donde:

- $\theta$  = Flujo magnético [Wb]
- $B$  = Campo magnético [Tesla]
- $S$  = Superficie [ $m^2$ ]

Al tomar en cuenta que el campo magnético  $B$  es variable con respecto al tiempo en una superficie se puede inducir corriente en un conducto como lo muestra la ilustración 4:

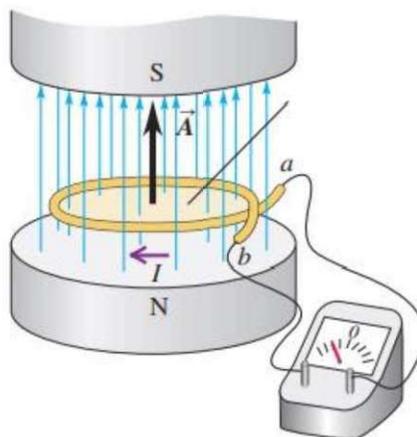


Ilustración 4: Inducción electromagnética (Zemansky, 2018)

En la figura se muestra como la corriente es inducida al conductor cuando está presente un campo magnético variable con el tiempo, si se observa con detenimiento el conductor realiza una espiral para crear un área circular por la cual el pasa el campo magnético. Cuando el número de espirales aumenta la corriente en el conductor de igual manera aumenta ya que la ecuación 4 queda expresada de la siguiente manera:

$$\varepsilon = -N \frac{dB}{dt} S$$

Ecuación 3: Fuerza electromagnética inducida

Con esta relación comienza el principio de generación de energía que mediante el movimiento de un campo magnético constante sobre un conductor hace que el campo magnético varíe con respecto al tiempo e induzca corriente eléctrica sobre el conductor.

### **3.4 Energía hidráulica**

La energía hidráulica es una de las energías renovables más aprovechadas en el mundo, y es tan popular debido a que su recurso primario es el agua y a que su tecnología se ha vuelto más eficiente. Esta permite generar energía eléctrica a partir del flujo de agua a través de las turbinas, es tan utilizada porque genera energía de manera constante tal como una planta térmica de combustión. El principio de este tipo de planta eléctrica es, en primer lugar, para represas hidroeléctricas, es almacenar el agua en un embalse, teniendo así inicialmente energía potencial. Luego a través de compuertas y tuberías se transforma en energía cinética, ya que al haber una diferencia de alturas y proporcionar una salida del embalse el agua fluye hacia las turbinas, las turbinas convierten parte de la energía cinética del agua en energía mecánica, esta turbina o turbinas están conectadas al eje de un generador síncrono que entrega energía a la subestación elevadora y la entrega al sistema interconectado. Las represas están condicionadas a los fenómenos naturales, tales como las lluvias y también a los desastres naturales como huracanes y sequías. A pesar de estas variantes es considerada una energía sólida y de bastante confiabilidad.

### 3.5 Sistema de regulación primaria de la energía

En los sistemas interconectados donde participan tanto generadores como consumidores y la energía es transportada por líneas de transmisión y distribución se representan como sistemas de potencia, esto para permitir el análisis de los sistemas en sus diferentes variables. El fin del análisis de un sistema de potencia es determinar y planificar nuevas centrales eléctricas y conocer el comportamiento de la frecuencia, ángulo y voltaje del sistema en general. Cuando se habla sobre regulación primaria, se refiere a la respuesta del sistema de generación para estabilizar la frecuencia debido a un cambio brusco en la demanda de la red, ya sea por la entrada de una carga significativa o por la desconexión de una central. A continuación, se presentan los tiempos de respuesta por cada sistema de regulación:



Ilustración 5: Tiempo de reacción por cada sistema de regulación (Red Eléctrica de España, 2021)

### 3.6 Marco legal

El sector eléctrico en el país está regido bajo un marco legal que regula la dinámica entre la oferta y la demanda, sus precios y requisitos técnicos a cumplir. En Honduras la ley más reciente que estipula el manejo de la energía eléctrica en el país es la Ley General de la Industria Eléctrica, dicha ley promueve las energías renovables y liberaliza el mercado eléctrico nacional para que exista competencia en los precios y mejorar la distribución y comercialización de la energía. Un nuevo ente como el Operador de Sistema (ODS) que gestiona la compra y venta de la energía eléctrica

en el país, así como la Comisión Reguladora de la Energía Eléctrica (CREE) que regula los aspectos técnicos del Sistema Interconectado Nacional (SIN). Es en el acuerdo CREE-077 en donde se especifican las potencias mínimas requeridas para la regulación primaria y secundaria de la energía eléctrica y en la sección 8 de criterios de desempeño, en el apartado 1 especifica lo siguiente:

“La reserva total asignada por el ODS para regulación primaria en el SIN debe ser como mínimo la requerida en el RMER: el 5% de la demanda durante periodos de demanda máxima, media y mínima.” (CREE, 2020, p. 68)

Es necesario realizar estudios técnicos para lograr determinar estas demandas máximas, medias y mínimas y dimensionar de forma correcta el sistema de regulación primaria.

### **3.7 Almacenamiento de la energía**

Un gran paso para el desarrollo de las energías renovables fue el almacenamiento de la energía excedente de los sistemas de generación. Existe una gran variedad de tecnologías de almacenamiento, y cada una tiene una capacidad y rendimiento específico variado, y que se adapta a las necesidades. El almacenamiento permite que un sistema fotovoltaico o una planta eólica pueda mejorar su factor de planta, en una comparación con un sistema fotovoltaico híbrido con un generador diésel, normalmente el sistema fotovoltaico suplía el 8% de la energía consumida por el edificio y 92% lo suplía el generador diésel, pero luego de implementar un sistema de almacenamiento se logró aumentar a un 49% la generación por energía fotovoltaica y un 51% por el generador diésel (Aly et al., 2019). Claramente se puede observar el mejoramiento del desempeño del sistema renovable con la implementación de almacenamiento, en particular baterías inerciales y una batería de litio.

#### **3.7.1 Baterías inerciales**

Las baterías inerciales o FES por sus siglas en inglés (Flywheel Energy Storage), son normalmente usadas en regulación primaria debido al corto tiempo en que abastece la red con potencia, pero es una respuesta inmediata y con una gran cantidad de potencia que permite al sistema

recuperarse. Es un sistema antiguo ya que en los primeros motores de combustión se utilizaba este tipo de sistema para el arranque de los motores. En la actualidad existen grandes plantas de baterías inerciales que estabilizan microrredes con bastante demanda como lo es la central de Beacon Energy en Nueva York con 20 MW de potencia instalada.

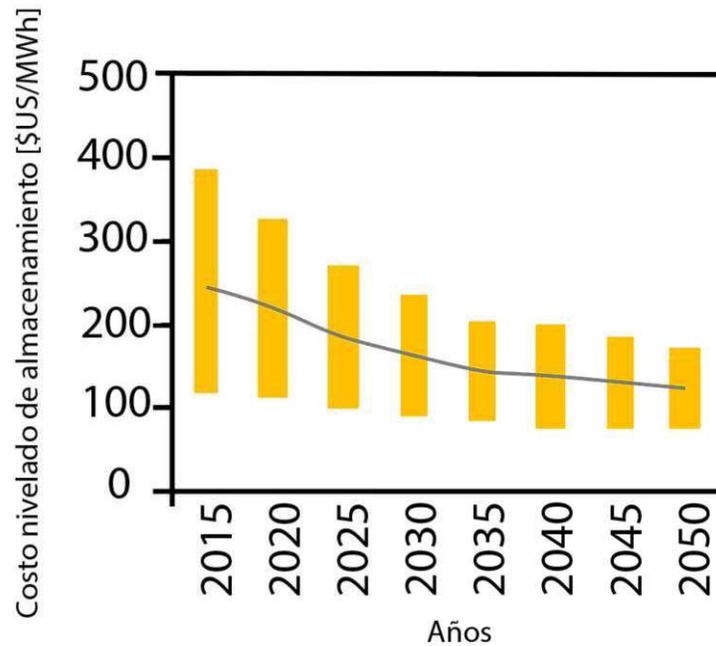


Ilustración 6: Costo nivelado de almacenamiento [US\$ / MWh] (Schmidt et al., 2019)

Es muy importante señalar que a medida se van desarrollando más investigaciones los precios disminuyen y se vuelve cada vez más factible su utilización.

## **IV. METODOLOGÍA**

Para poder desarrollar una investigación de forma clara y definida se deben establecer varios parámetros que indiquen una senda a seguir durante toda la investigación. A partir de la metodología se pueden visualizar el proceso que se llevará a cabo para responder de manera específicamente las preguntas de investigación, y cumplir con los objetivos previamente mencionados.

### **4.1 ENFOQUE**

La investigación está orientada a el análisis de la respuesta de baterías inerciales a un cambio abrupto de potencia, regulando así, de forma primaria, la frecuencia llegando a estabilizarla y posteriormente dando paso a un sistema secundario que mantenga la potencia por un lapso mayor de tiempo. Es importante definir el enfoque de la investigación para determinar qué tipo de alcance y diseño se desarrollará en la investigación.

Se utilizó un enfoque cuantitativo debido a las características de las variables, ya que son datos numéricos y comportamiento medibles cuantitativamente. Refleja la necesidad de medir y estimar magnitudes de los fenómenos o problemas de la investigación (Sampieri, 2014). Dentro del enfoque se tienen un alcance descriptivo, pues uno de los objetivos es explorar, pero también medir y definir variables importantes con respecto al impacto que tienen las baterías inerciales en la regulación primaria y medir la respuesta de una micro red con este tipo de almacenamiento de energía.

### **4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN**

Las variables de la investigación dan una perspectiva más amplia de lo desarrollado y estudiado, es determinante especificar cuáles de ellas son dependientes e independientes y cuál es su relación entre ellas ya que dan dirección a la investigación.

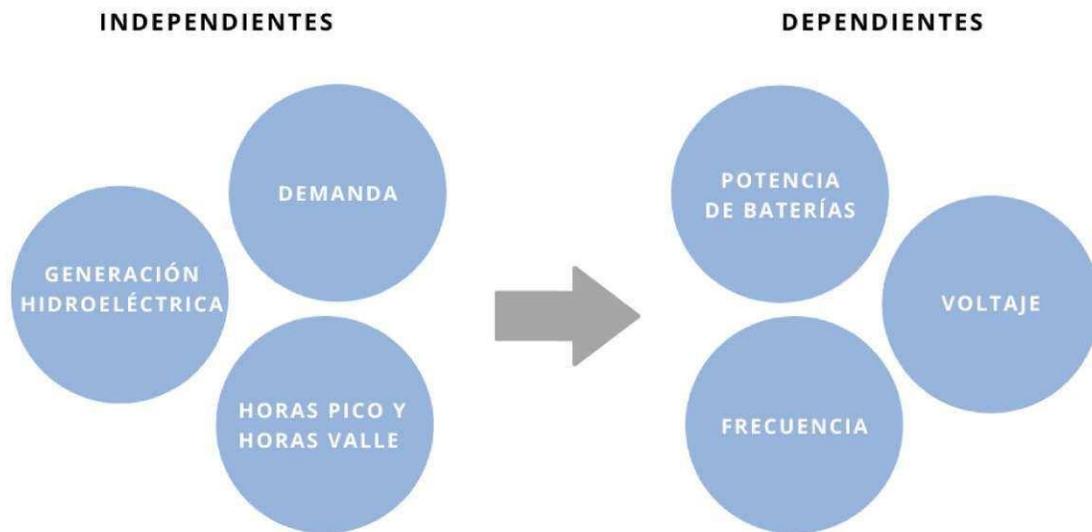


Ilustración 7: Variables de investigación

#### 4.2.1 VARIABLES INDEPENDIENTES

Las variables independientes son aquellas que afecta directa o indirectamente a las variables dependientes que se están estudiando. Definirlas permite entender su comportamiento y la causa por la cual las variables dependientes tiene cierto comportamiento. Las siguientes son las variables independientes de la investigación:

1. Demanda en la subestación de Comayagua
2. Hora pico y horas valle
3. Generación hidroeléctrica

#### 4.2.2 Variables dependientes

Estas están condicionadas por las variables independientes y son clave para el desarrollo de la investigación ya que se pueden alterar con el fin de encontrar resultados y comportamientos de interés. Estas variables son la siguientes:

1. Frecuencia de la red
2. Voltaje nominal de la red
3. Potencia de baterías inerciales instalada

### **4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS**

A continuación, se detallarán las técnicas que se utilizaron para determinar los resultados y los instrumentos que se aplicaron en el desarrollo de la investigación.

#### **4.3.1 MATLAB/Simulink**

Es un software en el cual se desarrolló la simulación que mostró el comportamiento de una micro red en el momento de un cambio abrupto de potencia y como las baterías inerciales funcionaron como reguladores de energía primaria. En especial se utilizó Simscape, una librería especial para el desarrollo de sistemas eléctricos, tanto en micro como en macro escala como sistemas de potencia interconectados parecidos al sistema interconectado nacional (SIN).

#### **4.3.2 Microsoft Office 365 Excel**

Este software fue en el cual se analizó el perfil de demanda eléctrica de la subestación de Comayagua (CYG) y en particular el circuito al cual está interconectada la central hidroeléctrica "La Esperanza", el circuito L317. También se utilizó para el análisis de las gráficas de dicho perfil y almacenar los resultados del comportamiento del sistema.

### **4.4 POBLACIÓN Y MUESTRA**

La información que se utilizó y fue necesaria para el desarrollo de la investigación fueron los perfiles de demanda eléctrica de la subestación CYG y en especial del circuito L317 donde está interconectada la central hidroeléctrica, con este comportamiento se logrará estimar la potencia instalada de las baterías inerciales para poder ser considerado como regulación primaria. Se dispuso del perfil de demanda eléctrica de 2019 y 2020, resaltando la potencia máxima demandada y los diferenciales de potencia más amplios del sistema.

### **4.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO**

Para cumplir con los objetivos de la investigación se presenta a continuación, la metodología de estudio que se implementará de esta forma tener una pauta del desarrollo de esta.

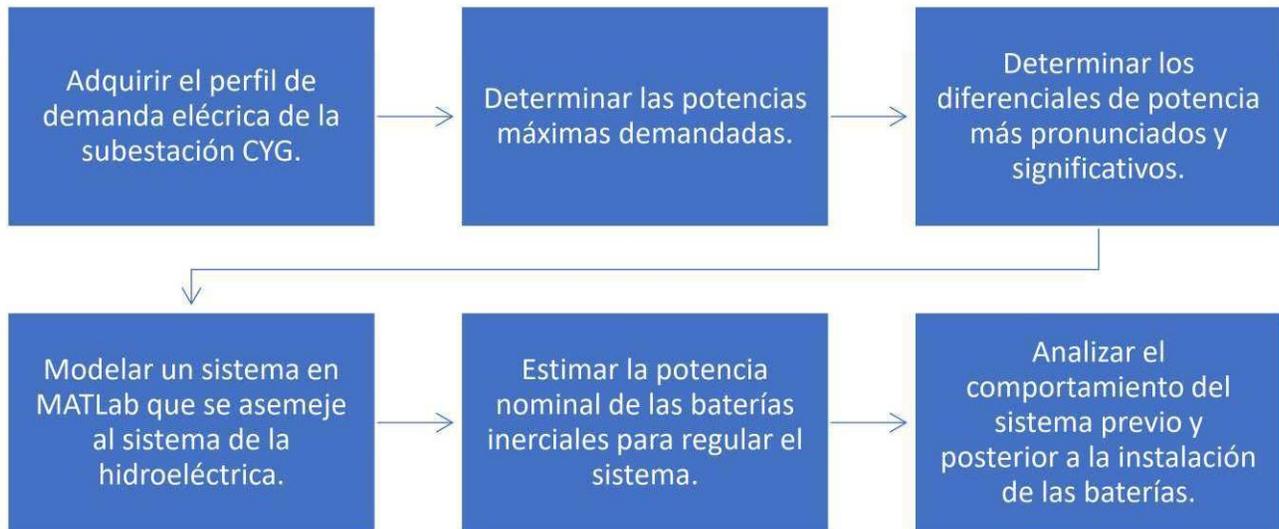


Ilustración 8: Metodología de estudio

#### 4.5.1 Adquirir perfil de demanda eléctrica de la subestación CYG

Para lograr simular el desempeño real del sistema es necesaria la adquisición del perfil de demanda eléctrica de la subestación a la cual la hidroeléctrica se conecta para suministrar la energía necesaria. Este perfil es uno de los parámetros de entrada para la simulación ya que se utilizará una carga variable que demande potencia a la red de manera similar a la real.

A continuación, se muestra el modelo de las demandas promedio diarias del circuito L317 que fueron obtenidas de la base de datos de EEH.

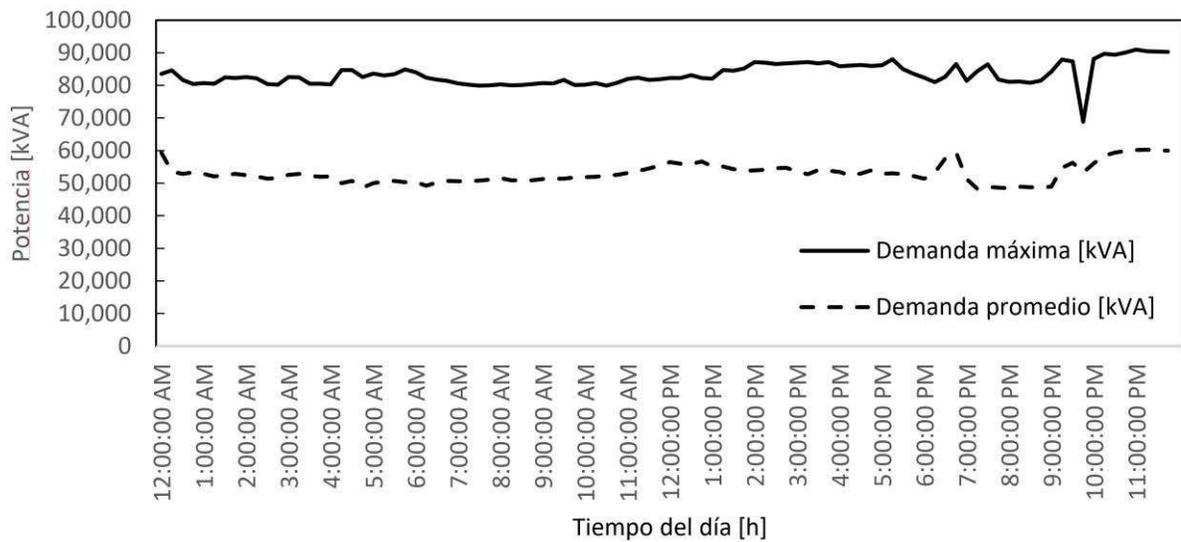


Gráfico 2: Perfil de demanda eléctrica máxima y promedio diario en la subestación CYG (EEH, 2019)

#### 4.5.2 Determinar las potencias máximas demandadas

Es de gran importancia lograr determinar la potencia máxima demanda por la red para que de esta forma se dimensione la capacidad de las baterías inerciales a instalar. Con la ayuda de las formula MAX de Excel logramos determinar las potencias máximas para cada hora del día en los años 2019 y 2020. Las potencias máximas registradas en cada hora del día fueron los siguientes:

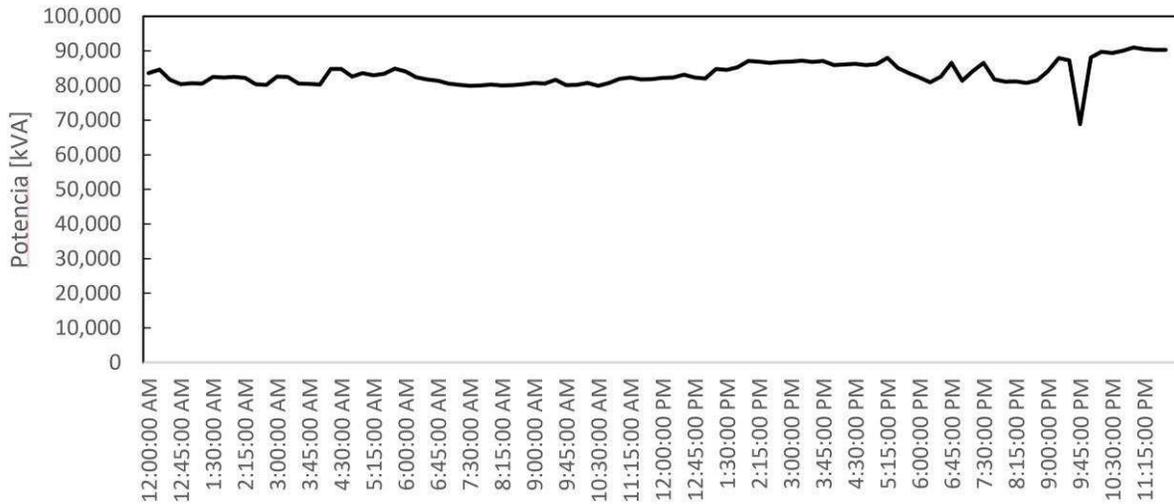


Gráfico 3: Demanda máxima por hora

#### 4.5.3 Determinar las diferencias de potencia más significativos

Con la implementación de un sistema de regulación primaria es de gran ayuda determinar los picos de potencia y los diferenciales más significativos para de esta forma analizar el tiempo en que se realiza la estabilización de la red. Ya que un alto cambio de potencia conlleva a una gran disminución de la frecuencia y por lo que es necesario una respuesta inmediata para que la central hidroeléctrica supla esta potencia.

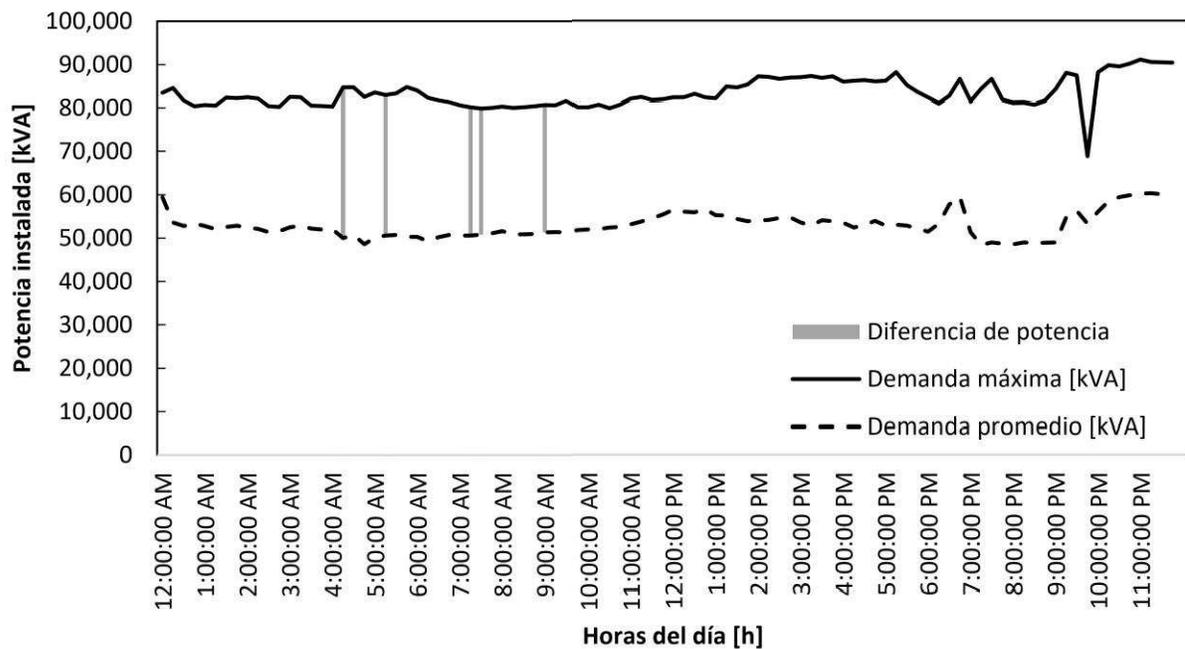


Gráfico 4: Mayores diferencias de potencia demandada

#### 4.5.4 Modelar el sistema en MATHLab/Simulink

Se modelará un sistema con las características de la red, tales como el perfil de demanda y los sistemas que suplen la potencia a la red. Estos sistemas se dividen en los siguientes:

1. Carga variable: Que tendrá el perfil de demanda eléctrica de la subestación.
2. Generador diésel: Este solo se tomará en cuenta para simular el sistema antes de la implementación de las baterías inerciales.
3. Hidroeléctrica: Un sistema que modela el perfil de planta de la hidroeléctrica “La Esperanza”, dependiendo del comportamiento de la carga variable.
4. Carga base: Es necesario contar con una carga base para la simulación, ya que es mediante esta que se sincroniza el generador y todo el sistema.
5. Fuente trifásica: Esta fuente de corriente trifásica es la que establece la frecuencia y el voltaje nominal de la red para que todos los sistemas interconectados se sincronicen.

Posteriormente es eliminada para que el sistema trabaje en modo aislado y que sean las centrales eléctricas las que suplan la demanda.

6. Batería inercial: Esta estará conectada en paralelo a las fuentes y de esta manera poder abastecerse y suplir la demanda de la red.
7. Otras fuentes de generación: En el circuito L317 están conectadas dos fuentes que serán constantes en la simulación para analizar específicamente el comportamiento entre la central hidroeléctrica y las baterías inerciales.

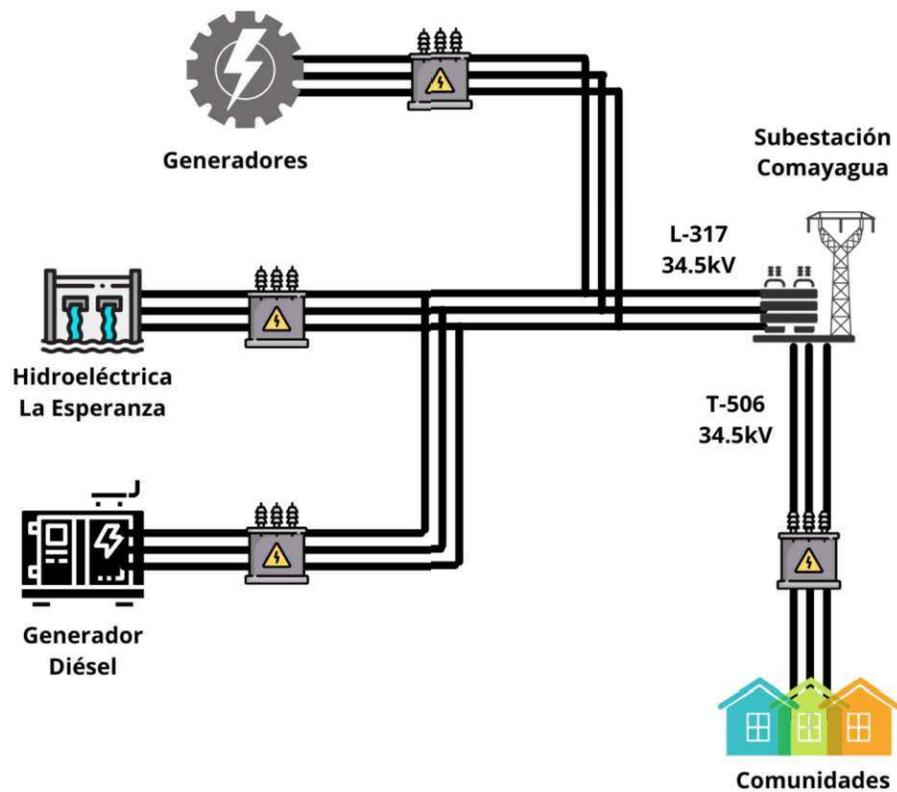


Ilustración 9: Esquema del sistema antes de la implementación

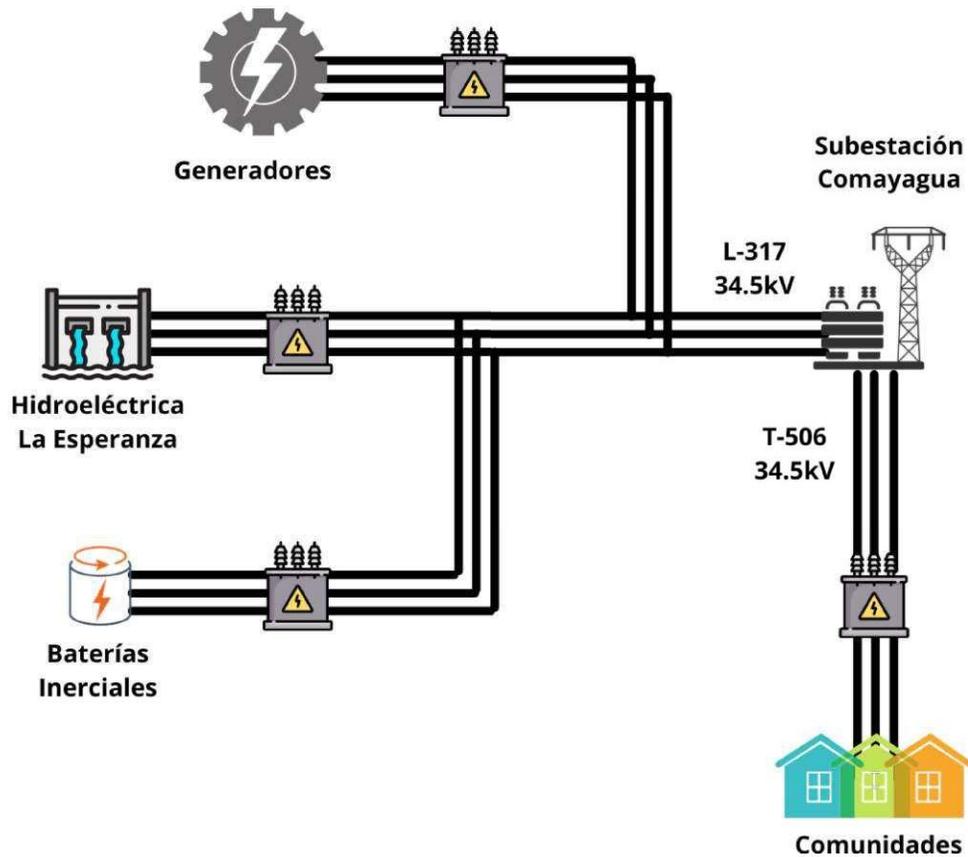


Ilustración 10: Esquema del sistema después de la implementación

En la Ilustración 6 se muestra el sistema antes y después de la implementación de las baterías inerciales.

Carga Variable: Para simular la carga variable se necesitaron los siguientes parámetros de entrada:

- Graficadora de datos discretos (From File)
- Datos del perfil de demanda eléctrica en una matriz
- Parámetros eléctricos
  - o Voltaje
  - o Frecuencia
  - o Factor de potencia
- Conexión a la Microred

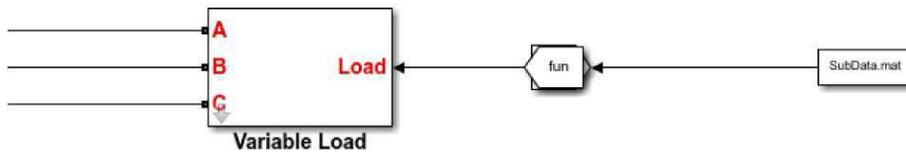


Ilustración 11: Diagrama en MATLAB/Simulink

Generador diésel: Para el generador diésel necesitan los siguientes módulos y parámetros de entrada:

Tabla 1: Parámetro de entrada del generador diésel

Parámetro	Valor	Unidades
Frecuencia de Referencia ( $\omega_{ref}$ )	60	Hz
Voltaje de Referencia ( $V_{ref}$ )	5,000	V
Potencia Nominal	700	kW
Voltaje Nominal	5,000	V
Frecuencia Nominal	60	Hz
Potencia Mecánica	700	kW
Voltaje de Campo Magnético	5,000	V

La representación en MATLAB/Simulink sería la siguiente:

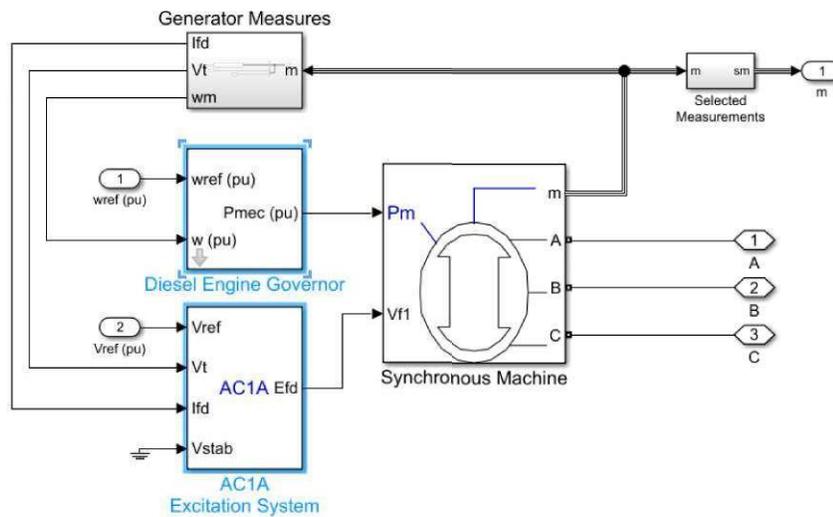


Ilustración 12: Diagrama del generador en MATLAB/Simulink

Central hidroeléctrica: Para la central hidroeléctrica se tomarán en cuenta varios parámetros característicos de esta tecnología.

Tabla 2: Parámetros para la central hidroeléctrica

Parámetro	Valores	Unidades
Frecuencia de Referencia ( $\omega_{ref}$ )	60	Hz
Voltaje de Referencia ( $V_{ref}$ )	5,000	V
Potencia Nominal	13.2	MW
Voltaje Nominal	5,000	V
Frecuencia Nominal	60	Hz
Voltaje de Campo Magnético	5,000	V

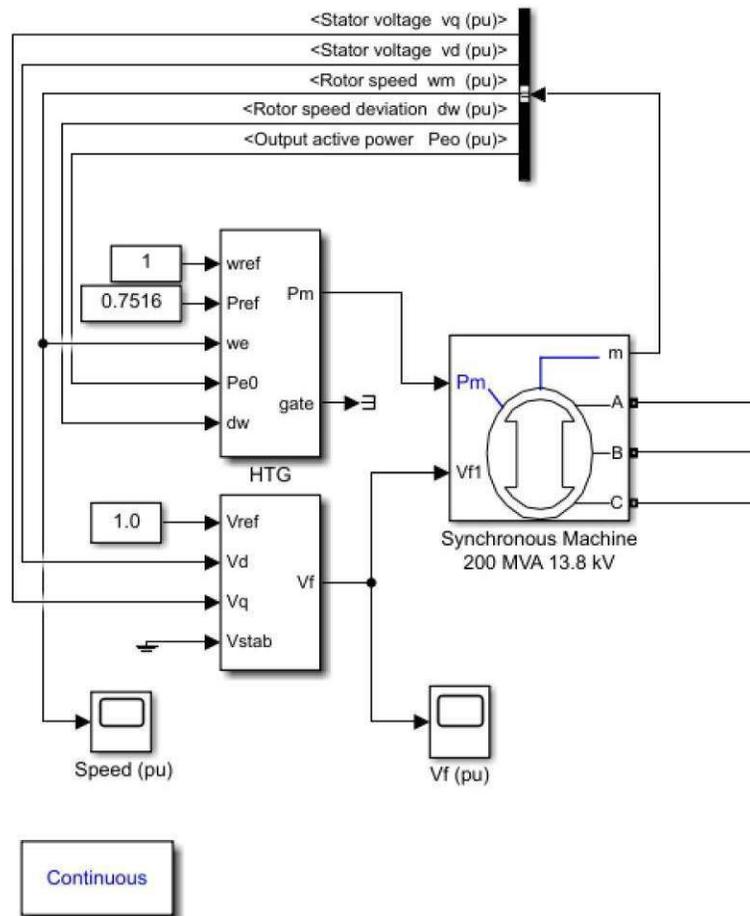


Ilustración 13: Diagrama de la central hidroeléctrica en MATLab/Simulink

#### 4.5.5 Estimar la potencia nominal de las baterías inerciales

Para determinar y dimensionar la potencia nominal de las baterías inerciales es necesario conocer la potencia de la planta y calcular el 5% de este ya que según la ley de la industria eléctrica se necesita el 5% de la potencia instalada para tomarla como regulación primaria. Al estimar correctamente la potencia a instalar, se procede a modificar los valores de entrada de la simulación y analizar su reacción.

#### 4.5.6 Analizar el comportamiento del sistema previo y posterior a la instalación

Analizar el comportamiento a partir de gráficas que muestren los cambios de demanda y cómo estos se reflejan en la estabilidad de la frecuencia, así también ver el tiempo de respuesta del sistema de regulación para mantener el sistema estable.

En la simulación se harán las siguientes pruebas para determinar el desempeño del sistema en términos de frecuencia y voltaje antes y después de la instalación de las baterías inerciales.

1. Condición de isla: En esta prueba se analizará el comportamiento de la Microred cuando es desconectado del sistema interconectado, que es simulado por la fuente de corriente trifásica. En el momento de la desconexión la demanda es suplida por las fuentes de generación, creando inestabilidad en la frecuencia debido a que se aumenta la demanda que se estaba entregando por parte de las centrales. Es en este momento que el sistema de regulación primaria suple este déficit de potencia con las baterías inerciales y estabiliza la red mientras las fuentes de generación progresivamente suplen la demanda en su totalidad.
2. Cambios abruptos de potencia: Se simulará el cambio abrupto de potencia con diferentes diferenciales de potencia, esto para que el sistema de regulación supla la potencia que esta central estaba supliendo y dar un lapso de entre 30 segundo a 5 minutos para que las demás centrales puedan suplir la demanda.

#### 4.6 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Actividad para la elaboración del proyecto de investigación	Semanas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Introducción								■		
Definir tema de investigación		■								
Planteamiento del problema			■							
Marco Teórico				■	■					
Metodología					■	■				
Análisis de datos							■			
Elaboración de simulación					■	■	■	■		
Resultados y Análisis								■		
Conclusiones									■	
Recomendaciones									■	

Bibliografía										
Anexos										
Artículo Científico										
Pre-defensa										

## V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para la simulación se utilizó las diferencias de potencia más abruptas obtenidas después de procesar los datos de la subestación en la línea L-317. Es seleccionaron 5 cambios que ayudan a apreciar el comportamiento del sistema regulación primaria y como este cambia cuando las diferencias de potencia van disminuyendo. A continuación, presentan las potencias de los perfiles de carga que se utilizaron.

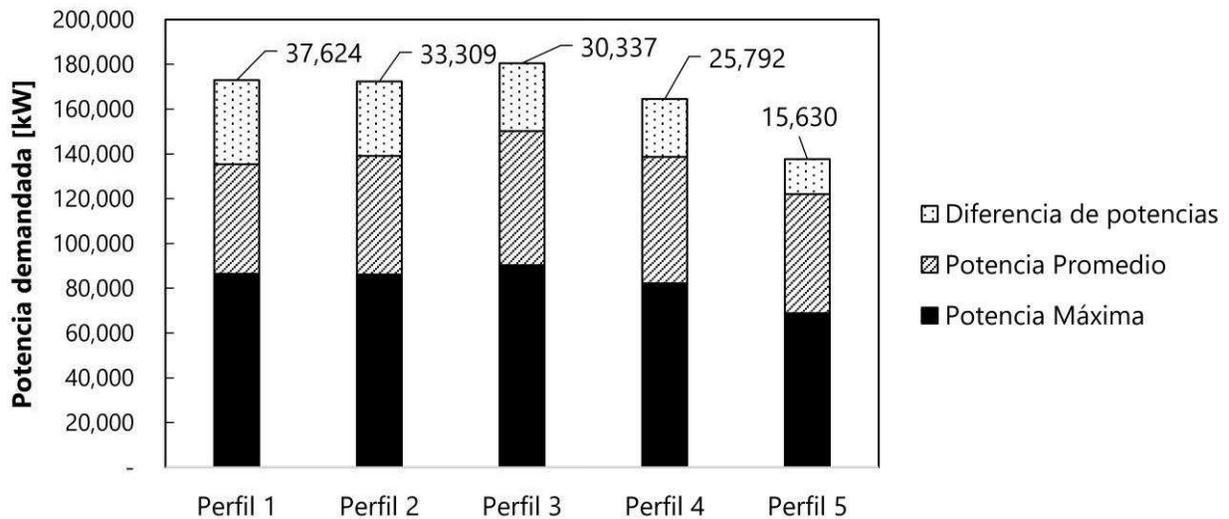


Gráfico 5: Perfiles de demanda con sus potencias máximas y promedio. (Elaboración propia)

Como entrada de carga variable se simularon estos perfiles de demanda con los cambios de potencia en el segundo 90 para que de esta forma se lograra notar el comportamiento de la frecuencia ante estos cambios.

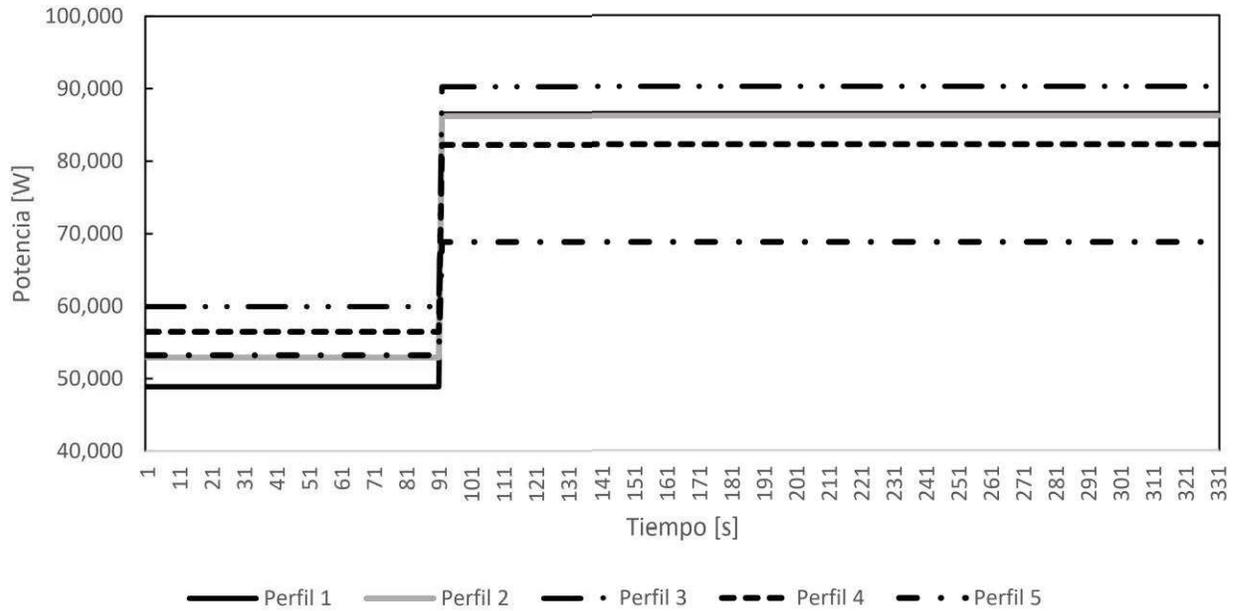
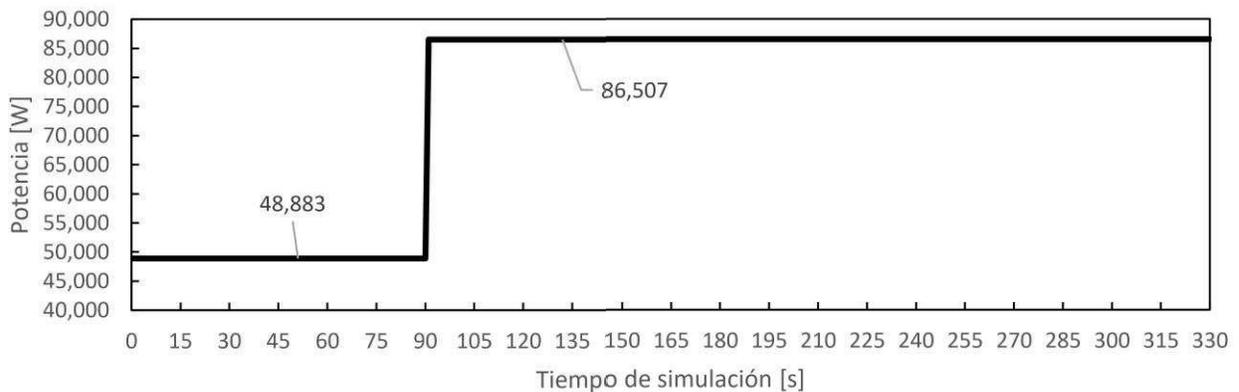


Gráfico 6: Perfiles de carga que se simularon como carga variable (Elaboración propia)

### 5.1 Resultados del Perfil 1

El perfil 1 se simuló con y sin la implementación de las baterías inerciales en la regulación primaria que a continuación, se muestran los cambios que presentaron la hidroeléctrica, el generador diésel y la batería inercial en sus perfiles de generación.



#### 5.1.1 Frecuencia

El valor de la frecuencia fue afectado en dos momentos, primero con la entrada a modo isla y posteriormente en el cambio brusco de potencia que se presentó en la demanda.

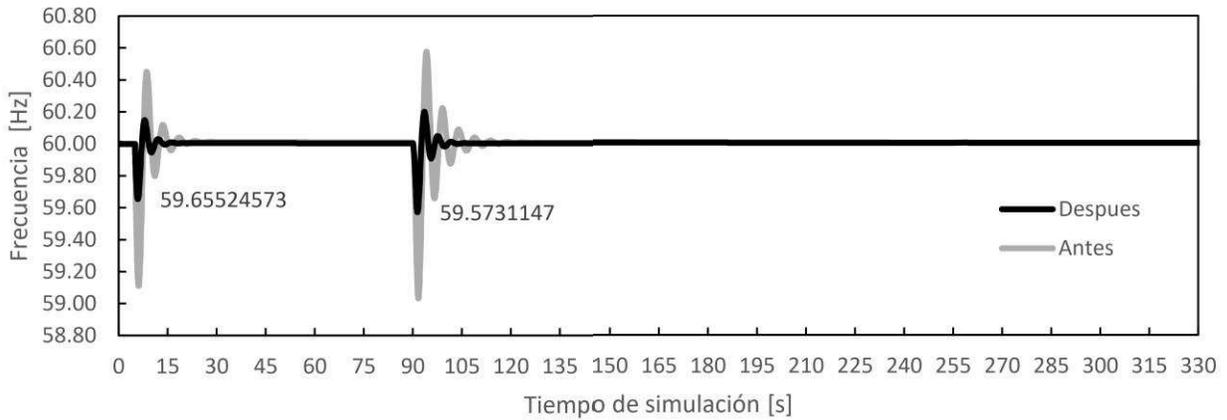


Gráfico 7: Valor de la frecuencia en la simulación

Como resultado de la implementación de las baterías inerciales se aprecia una disminución significativa en la variación del valor de la frecuencia cuando se presentan las pruebas que se tenían previstas. Esta reducción es de 56% en los mínimos y de 65% en los máximos con respecto a 60Hz, la implementación mejora la estabilidad en el sistema ya que en este tiempo transitorio se pican de frecuencia que afectan a otros sistemas como motores y alternadores.

### 5.1.2 Generador diésel

El generador diésel también presento cambios en su perfil de generación ya que con la entra de las baterías inerciales la potencia requerida al generador era repartida con estas, el siguiente es el perfil de generación:

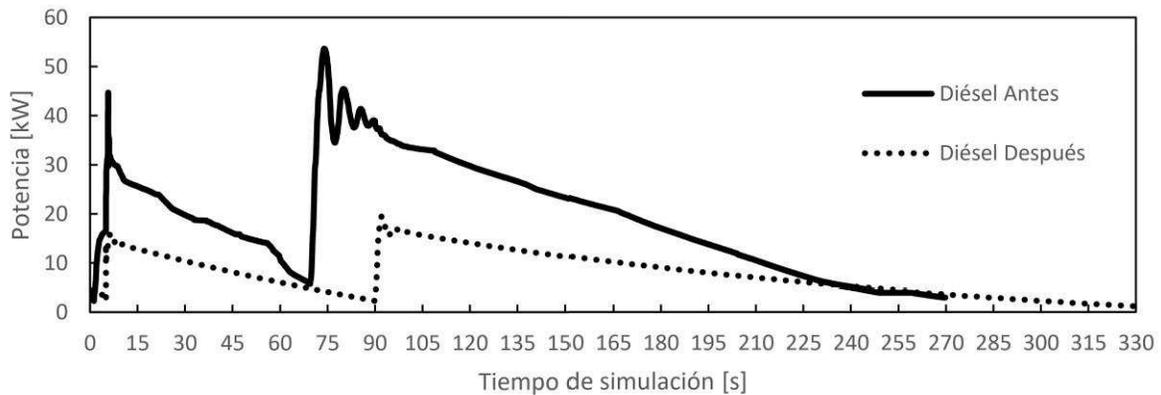


Gráfico 8: Perfil de generación de generador diésel

Es notable la reducción de la potencia que se requiere antes y después de la implementación de las baterías, la potencia máxima entregada por el generador disminuyó un 63.6% con respecto a la potencia máxima entregada antes de la implementación, esto evidencia el gran aporte de las baterías inerciales y la disminución en la dependencia de generadores diésel en los sistemas de regulación primaria de la energía.

### 5.1.3 Hidroeléctrica

En el perfil de la central hidroeléctrica también se encontró cambios en el perfil de generación, la hidroeléctrica comienza aumentando su potencia hasta llegar a suplir por completo la potencia demandada por la red, la simulación mostró el perfil antes y después de la implementación de las baterías:

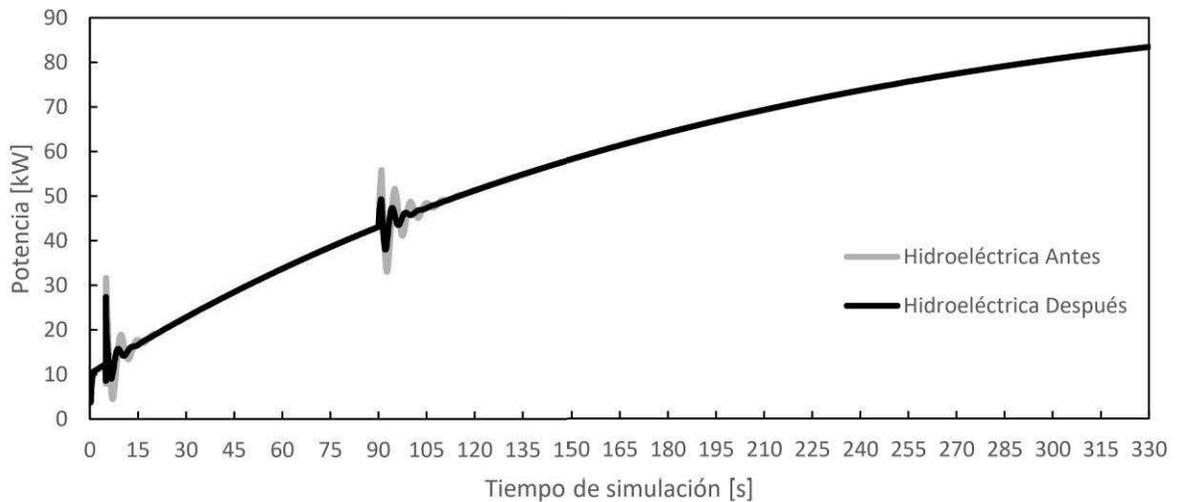


Gráfico 9: Perfil de generación de hidroeléctrica

En el perfil se aprecia los efectos que tuvo los cambios bruscos en la potencia demandada por la red, con la implementación de las baterías inerciales se redujo un 11.8% mejorando el rendimiento de la generación de la hidroeléctrica. A su vez se muestra que la curva de generación se mantuvo igual antes que después de la implementación de las baterías ya que la regulación primaria se enfoca en los momentos transitorios de la regulación de la energía.

### 5.1.4 Baterías inerciales

En el perfil de generación de las baterías inerciales se observa un cambio de potencia abrupto que indica la modalidad isla y el diferencial de potencia que se efectuó a los 90 segundos de simulación, el comportamiento fue el siguiente:

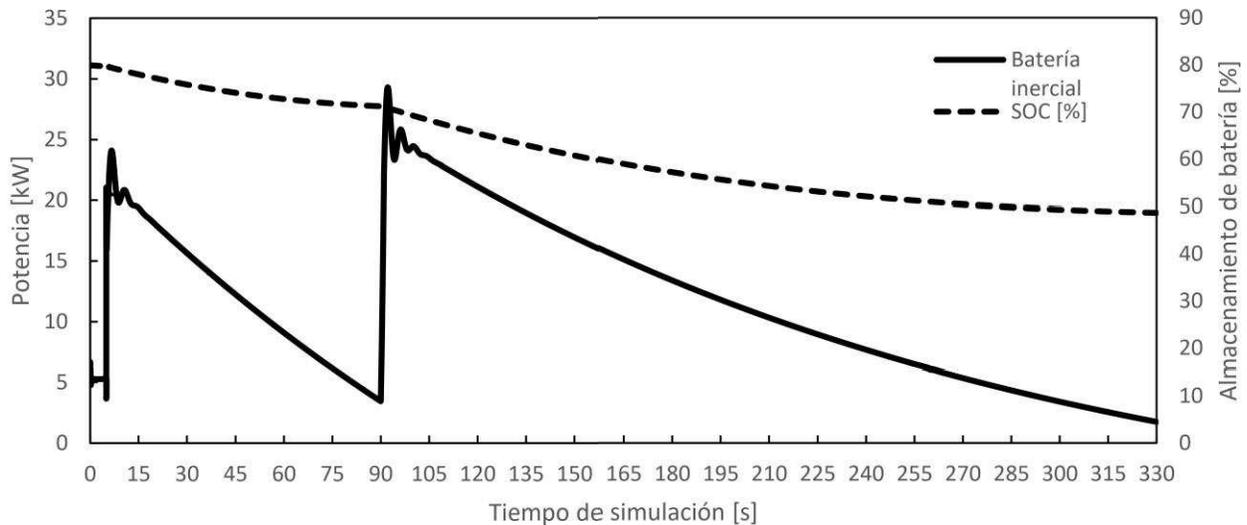
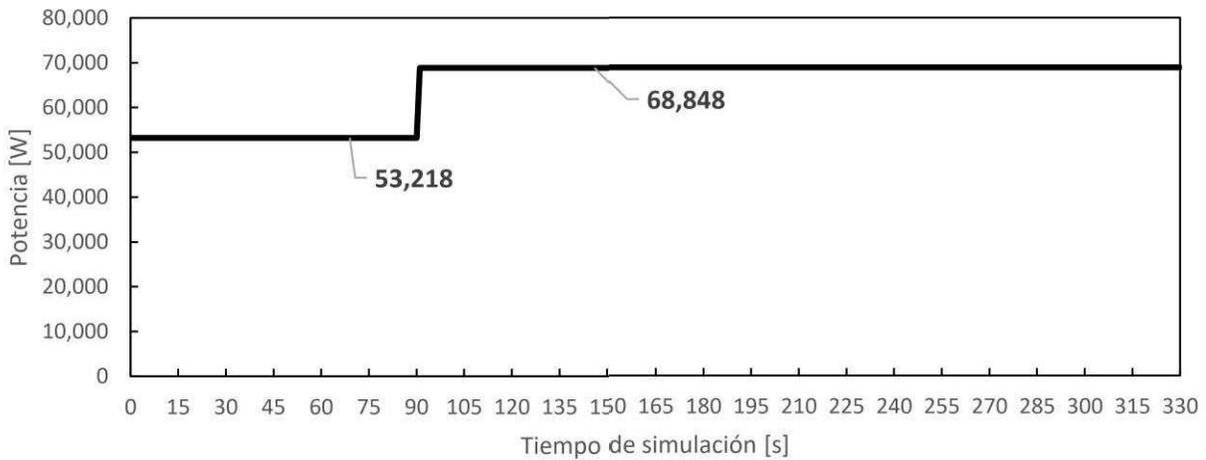


Gráfico 10: Perfil de generación de baterías inerciales y porcentaje de carga

La participación de las baterías en la regulación es notable, conforme pasan los segundos su carga va disminuyendo al igual que su potencia, esto debido a que la hidroeléctrica comienza paulatinamente a suplir la demanda de potencia que se necesita en la red. Este comportamiento hace que la batería no se descargue por completo y posteriormente comience su momento de carga. En ambas pruebas se puede ver que la pendiente de descarga es más pronunciada dependiendo de la potencia que está supliendo.

## 5.2 Resultados del Perfil

El perfil 5 se simuló con y sin la implementación de las baterías inerciales en la regulación primaria que a continuación, se muestran los cambios que presentaron la hidroeléctrica, el generador diésel y la batería inercial en sus perfiles de generación.



### 5.2.1 Frecuencia

El valor de la frecuencia en comparación al perfil anterior existe diferencias notables que resaltar antes y después de la implementación.

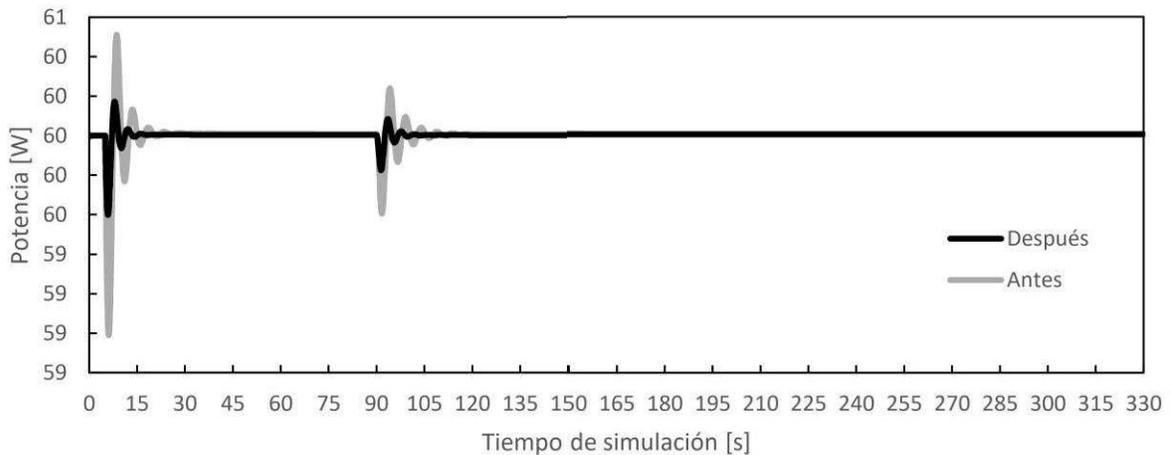


Gráfico 11: Valor de la frecuencia en la simulación

En este caso la reducción fue mayor debido a que la potencia es mayor que la anterior, a pesar de que el diferencial de potencia es menor el aporte sigue siendo significativo, se redujeron un 60% y un 66% los valores que están por debajo y alto de 60Hz respectivamente. También se aprecia que el amortiguamiento de la onda es menor y se estabiliza más rápido debido el diferencial de potencia que se presenta en este perfil.

## 5.2.2 Generador diésel

Así como en el perfil 1 el generador diésel también cambió su comportamiento antes y después de la implementación, su perfil de generación fue el siguiente:

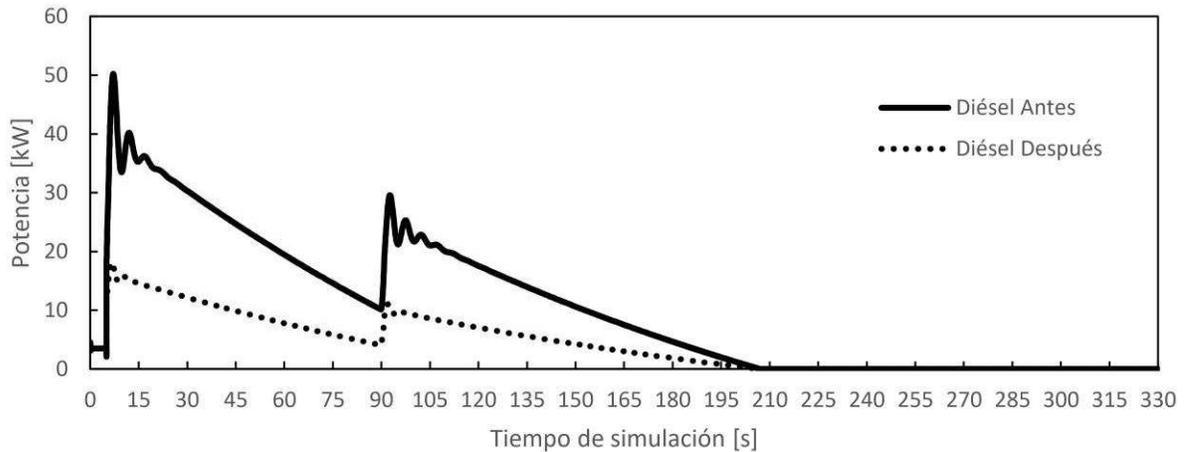


Gráfico 12: Perfil de generación de generador diésel

En este caso se nota la reducción de los picos de potencia que supe, pero a diferencia del perfil 1 llega más rápido a generación 0, esto debido a que el diferencial de potencia demandada es menor al anterior y logra dejar de aportar potencia en menos tiempo que el perfil anterior. En este perfil se logró reducir un 64.3% de la potencia máxima entregada a la red, reduciendo la participación del generador en la regulación primaria.

## 5.2.3 Hidroeléctrica

Con el perfil de generación de la hidroeléctrica se obtuvo un resultado interesante que fue el siguiente:

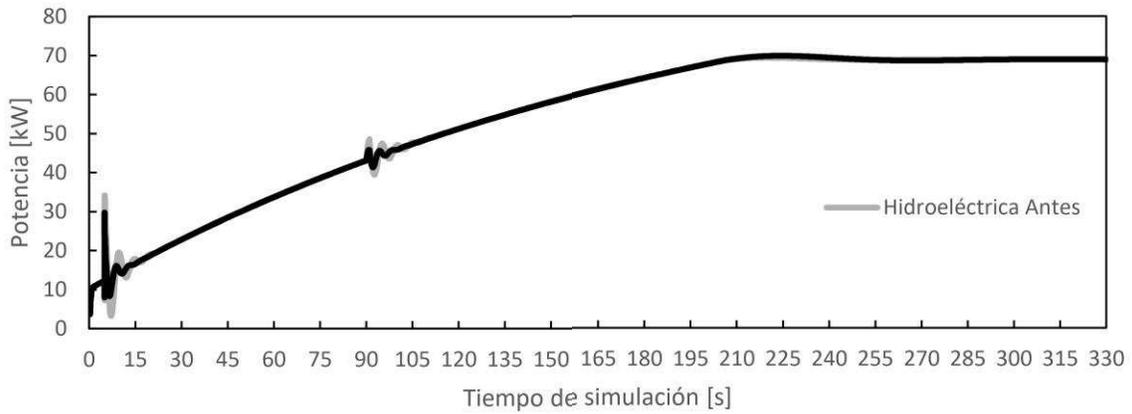


Gráfico 13: Perfil de generación de hidroeléctrica

En este los resultados mostraron que al tener un cambio de potencia menor, la hidroeléctrica supliría la demanda en un corto lapso, también se muestra que las variaciones en la generación también disminuyeron con la entrada de las baterías inerciales.

#### 5.2.4 Baterías inerciales

Para las baterías inerciales este perfil mostró otra característica, su función de carga, en este perfil resultó lo siguiente:

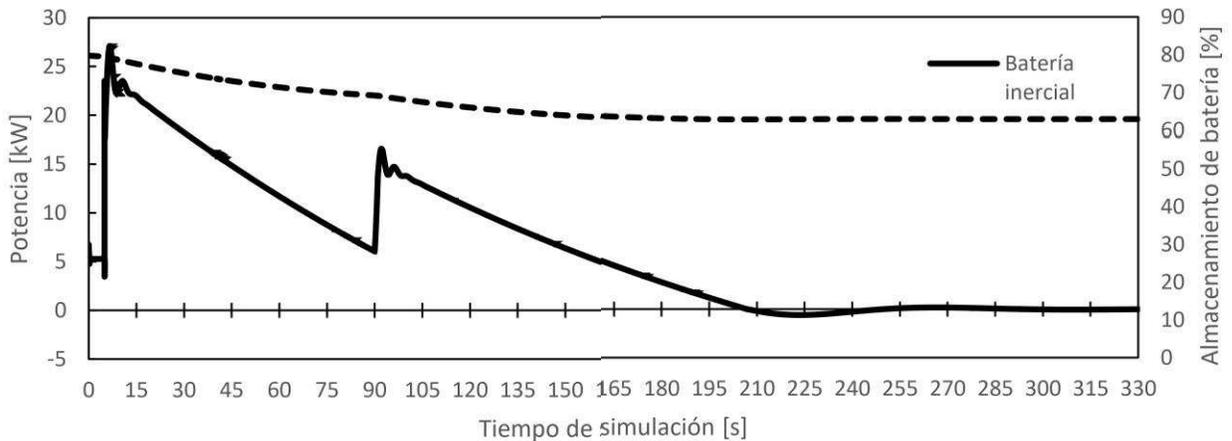


Gráfico 14: Perfil de generación de baterías inerciales y porcentaje de carga

Debido a que el diferencial de potencia demandada era menor que el anterior y que la central hidroeléctrica logró suplir la demanda, las baterías inerciales comenzaron a cargarse ya que no era necesario que entregara potencia. Se puede observar que respondió inmediatamente a los cambios de potencia y que permaneció cargada durante el proceso de transición, conservando hasta un 63% de carga excedente.

## VI. CONCLUSIONES

En la presente investigación se logró llegar a varias conclusiones a partir del análisis de los datos mostrados por la simulación, estos cumplieron con los objetivos determinados con anterioridad y a las preguntas de investigación que se realizaron previamente. Estos resultados revelaron lo siguiente:

- A partir del perfil de demanda que se ingresó a la simulación como carga variable, se logró determinar el rendimiento de las baterías inerciales aplicado a la regulación primaria de la energía. En el perfil de demanda de las baterías se observó como su potencia incrementó para lograr estabilizar la frecuencia cuando se pasó de estar interconectado a la red a estar en modalidad isla. También incremento su demanda cuando hubo un cambio brusco en la demanda que afectó la frecuencia de la microrred. Las baterías inerciales respondieron inmediatamente a estas perturbaciones de la red y regularon la estabilidad del sistema en cuanto a frecuencia y voltaje.
- El tiempo de descarga fue lo suficientemente largo para regular la red, la potencia que se dimensionó y la capacidad de almacenamiento que se consideró a partir de los modelos existentes y sugeridos para regulación primaria tuvieron un buen desempeño en la su dinámica con la red. En el primer perfil llegó a conservar un 48.7% de carga y en el perfil 5 conservó un 63%, y que posteriormente sería cargada para tener energía disponible para su uso.
- Se redujo la potencia que la planta de diésel entregaba a la red, la respuesta de las baterías inerciales afecto al perfil de generación de la planta de diésel, el pico de generación en el perfil 1 se redujo un 63.6% y en el perfil 5 un 64%, esto representa una gran disminución en la participación del generador diésel en la regulación primaria de la energía y aumentando la participación de energías renovables como las baterías inerciales
- La variación de la frecuencia se redujo en los valores altos un 65% en el perfil 1 y un 66% en el perfil 5 y para los valores que están por debajo de 60Hz se redujeron un 56% en el perfil 1 y un 60% en el perfil 5. La implementación de las baterías inerciales redujo la variación de la

frecuencia en el periodo transitorio al entrar a la modalidad isla y a los cambios bruscos de demanda en ambos perfiles. Al implementar un sistema que dispone de energía inmediata como la son las baterías inerciales se demostró que pueden ser fundamentales en la regulación primaria de la energía manteniendo estable la frecuencia y reduciendo caídas de frecuencia mayores a las permitidas en el marco regulatorio nacional.

La mayor limitación de la investigación es no contar con mayor variedad de baterías inerciales que tuvieran datos más específicos sobre su estructura eléctrica para que de esta forma se ajuste aún más a las especificaciones de diversas redes de distribución tanto aisladas como interconectadas.

A pesar de esta limitación se logró ver en los resultados las baterías inerciales son una gran opción para aumentar la participación de energías renovables en la matriz de generación de energía del país, dando mayor confiabilidad y estabilidad a estas energías y desplazando a las energías no renovables y contaminantes que predominan en la actualidad.

## **VII. RECOMENDACIONES**

- Implementar baterías inerciales como sistemas de regulación primaria ya que los resultados muestran que responden de manera inmediata a los cambios de potencia en la demanda, supliendo la potencia demandada y manteniendo la frecuencia estable hasta que la central hidroeléctrica suplió esta demanda.
- Se recomienda la aplicación de las baterías inerciales en la regulación primaria y secundaria de la energía ya que el tipo de respuesta cumplió con el objetivo de mantener la estabilidad durante el tiempo de transición a la cual se vio sometida la red.
- Se recomienda que el sistema de regulación sea en principio híbrido, para que se tome como referencia el perfil de demanda de generador diésel y tener como referencia este perfil para la implementación posterior de baterías inerciales y tenerlo como reserva para emergencias y periodos de mantenimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aly, A. M., Kassem, A. M., Sayed, K., & Aboelhassan, I. (2019). Design of Microgrid with Flywheel Energy Storage System Using HOMER Software for Case Study. *2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*. <https://doi.org/10.1109/itce.2019.8646441>
- Arenas, A., Mediavilla, P., Garcés, P., & García, F. (2013). *Estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia con generación renovable*. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0322.pdf>
- Arghandeh, R., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (2012). Flywheel energy storage systems for ride-through applications in a facility microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1955–1962. <https://doi.org/10.1109/tsg.2012.2212468>
- Belfedhal, Seifeddine & Berkouk, El Madjid. (2011). Modeling and Control of Wind Power Conversion System with a Flywheel Energy Storage System. *International Journal Of Renewable Energy Research, IJRER*. Vol.1. pp.152-161.
- BP. (2020). *Statistical Review of World Energy*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
- De, E., MACHADO, M., & MARTÍNEZ, D. (1994). El concepto de energía en los libros de texto: De las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sublenguaje. *Escuela de Física, Facultad de Ciencias, UCV, 47586 Caracas 1041-A*, 12(3), 369–380. <https://core.ac.uk/download/pdf/38990384.pdf>

- Farahani, K. M. (2012). Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for voltage regulation (Doctoral dissertation, Master's Thesis, Ryerson University, Toronto, Thesis and dissertations. Paper 1288).
- HernándezR., FernándezC., Baptista, P., MéndezS., & Paulina, C. (2014). *Metodología de la investigación*. Mcgraw-Hill Education.
- Leclercq, Ludovic & Robyns, Benoit & Grave, Jean-Michel, 2003. "Control based on fuzzy logic of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators," *Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM)*, Elsevier, vol. 63(3), pages 271-280.
- Muntean, M., Guizzardi, D., Schaaf, E., Crippa, M., Solazzo, E., Olivier, J., & Vignati, E. (2018). *Fossil co2 emissions of all world countries - 2018 report* (p. 241). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/83904>
- Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. *Joule*, 3(1), 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008>
- Sebastián, R., & Peña-Alzola, R. (2015). Control and simulation of a flywheel energy storage for a wind diesel power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 1049–1056. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.08.017>
- Su, W., Jin, T., & Wang, S. (2010). Modeling and simulation of short-term energy storage: Flywheel. *2010 International Conference on Advances in Energy Engineering*. <https://doi.org/10.1109/icaee.2010.5557629>
- Young, H. D., Freedman, R. A., A Lewis Ford, & Al, E. (2013). *Física universitaria*. Pearson.

## ANEXOS

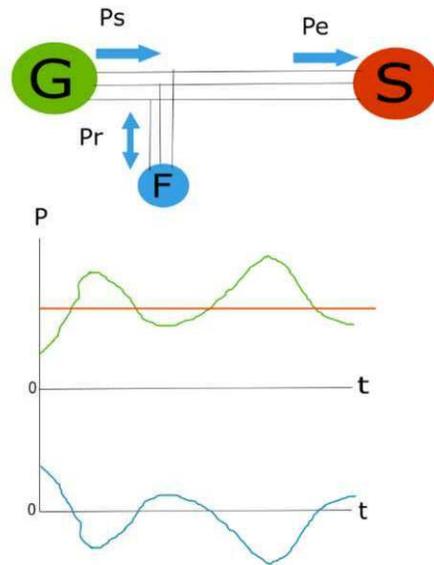


Ilustración 14: Esquema general