



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# ***Modelamiento y Simulación de una Micro-red Híbrida Aislada de la Red con Capacidad de Proporcionar Respuesta Primaria de Frecuencia***

***Departamento de Eléctrica, Electrónica y  
Telecomunicaciones***

***Carrera de Ingeniería en Electromecánica***

***Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
Ingeniero en Electromecánica***

**Autores:**

Montes Silva, Bryan Alejandro  
Tapia Pruna, Hernán Alejandro

**Tutor:**

Ing. Ortiz Villalba , Diego Edmundo MSc PhD

***MARZO 2024***



# AGENDA

- ANTECEDENTES
- MARCO TEÓRICO
- OBJETIVOS
- METODOLOGÍA
- CASO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES

# AGENDA

- ANTECEDENTES
- MARCO TEÓRICO
- OBJETIVOS
- METODOLOGÍA
- CASO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES

## MOTIVACIÓN

- El cambio climático y el deterioro del medio ambiente constituyen uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo, a lo cual aportan en gran medida los actuales sistemas de generación de energía.
- Sin embargo, al mismo tiempo representa una gran oportunidad para implementar proyectos innovadores que permitan minimizar los impactos ambientales, contribuyendo al desarrollo sostenible de la sociedad y de la economía.

### FUENTE: CIGRE

- En zonas urbano – marginales sufren de interrupciones, apagones y muchas veces en los sectores más alejados no tienen acceso a la red principal. La carencia del servicio eléctrico ha generado incertidumbre, malestar y preocupación en las personas que habitan las localidades por no contar con este servicio básico al encontrarse en zonas de difícil acceso.
- Existen localidades rurales en Ecuador en donde el suministro de energía eléctrica es intermitente lo que provoca desmejora en la calidad de vida, evitando que se generen o potencialicen procesos productivos.

# ANTECEDENTES

## DEFINICIONES MICRO- RED



Las micro-redes (MG) son sistemas de distribución de electricidad que contienen cargas y recursos energéticos distribuidos (como generadores distribuidos, dispositivos de almacenamiento o cargas controlables), que se pueden operar de manera controlada y coordinada, ya sea mientras están conectados a la red eléctrica principal o se encuentren en modo isla.



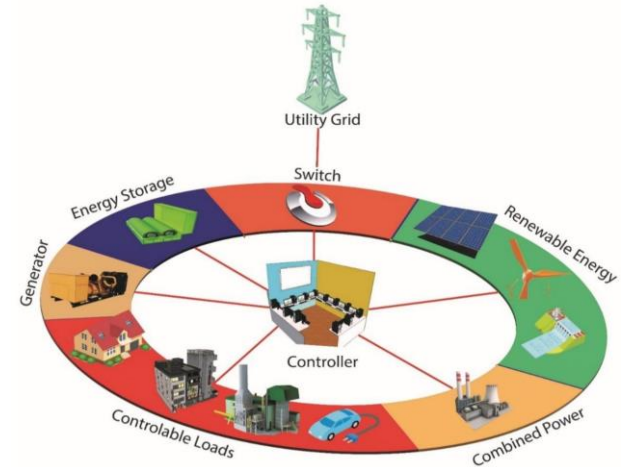
Subconjunto auto sustentable y autónomo de un área del sistema eléctrico que es capaz de operar de forma independiente o conectada a la red.



Una red de distribución de bajo voltaje que comprende generación distribuida, dispositivos de almacenamiento y cargas controlables que pueden operar interconectadas o aisladas de la red de distribución principal.

## IMPORTANCIA MICRO – RED

- ❑ La importancia de contar con una Micro-red recae en la integración fuentes renovables de energía al sistema de distribución tradicional, reduciendo el impacto ambiental y emisiones causadas por las fuentes tradicionales de generación.



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# AGENDA

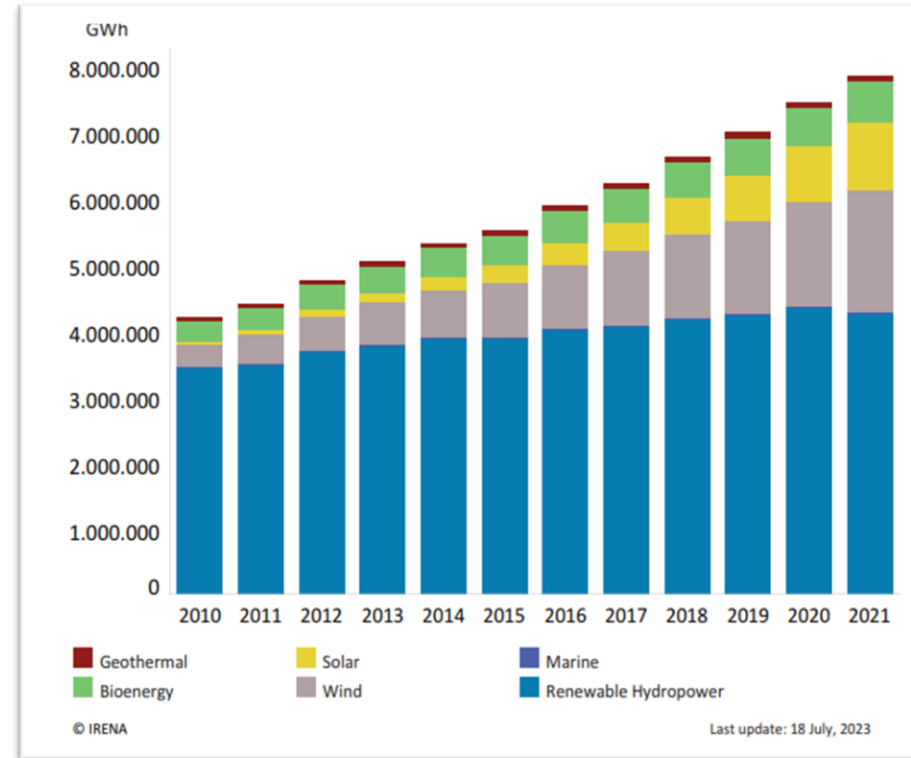
- ANTECEDENTES
- MARCO TEÓRICO
- OBJETIVOS
- METODOLOGÍA
- CASO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES

## ESTADO ACTUAL DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN ECUADOR

RESOLUCIÓN Nro. ARCERNNR-031/2023  
REGULACIÓN Nro. ARCERNNR-008/23

- La Regulación denominada «Marco normativo de la generación distribuida para el autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica».
- La Potencia Nominal de un SGDA está limitada de la siguiente manera:
  - a) Si no hay inyección de energía eléctrica a una red de distribución, la Potencia Nominal de un SGDA estará limitada por la demanda de potencia máxima registrada del Consumidor Regulado (asociado al SGDA), y por la capacidad de conexión aprobada por la Distribuidora. Para este caso, el Consumidor Regulado deberá implementar equipos de protección y control necesarios para impedir la inyección de energía eléctrica a la red de distribución.
  - b) Si hay inyección de energía eléctrica a una red de distribución, la Potencia Nominal de un SGDA estará limitada a 2 MW.

## CAPACIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MUNDIAL



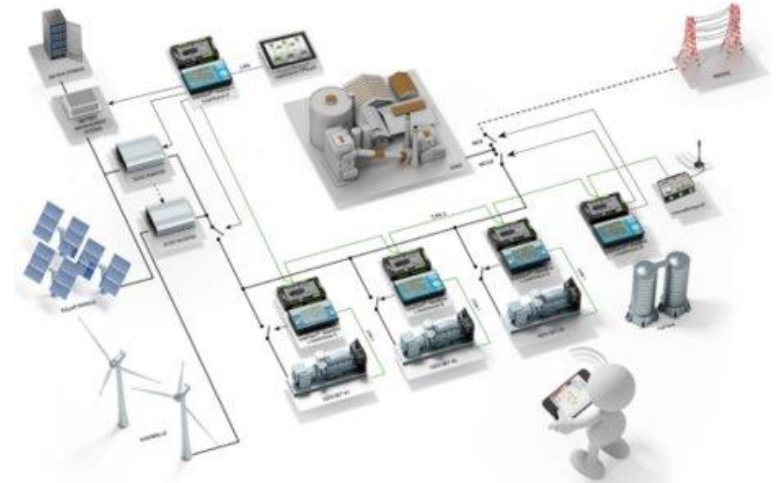
## TIPOS DE MICRO-RED

### MICRO-RED AISLADA DE LA RED

- Abastece la demanda eléctrica en zonas donde es difícil llegar con la red eléctrica convencional.
- Actualmente el costo de instalación y operación es alto, ya que aun no existe un desarrollo tecnológico avanzado.

### MICRO-RED CONECTADA DE LA RED

- Permite mantener el suministro de energía eléctrica cuando hay un corte en la red principal.
- Permiten reducir las emisiones de  $CO_2$



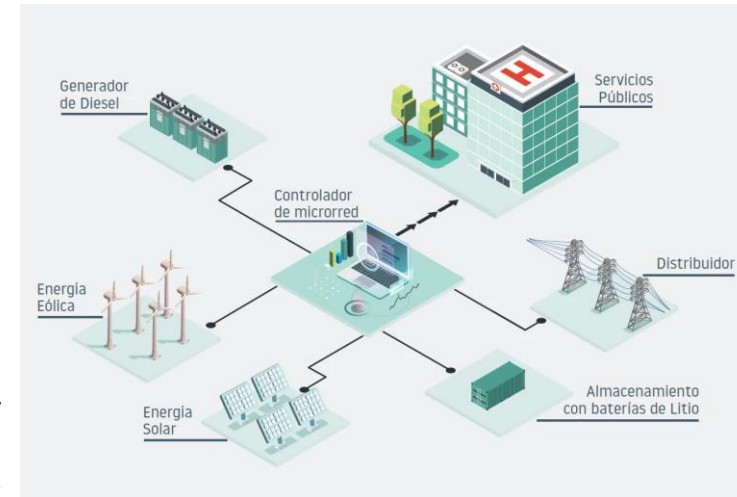


## BENEFICIOS MICRO-RED AISLADA DE LA RED

- En la actualidad los costos generación son menores
- Ayuda a cumplir los objetivos de sostenibilidad y emisiones.
- La capacidad de las energías renovables está aumentando rápidamente.
- Los parques eólicos y los paneles solares terrestres son, generalmente, mucho más pequeños que las centrales eléctricas tradicionales

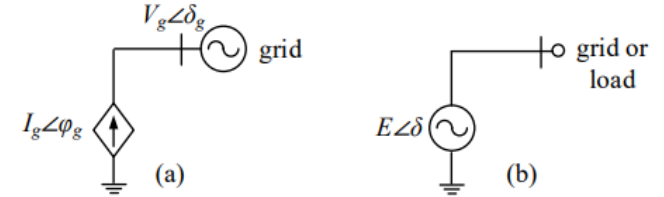
## DESAFÍOS MICRO-RED AISLADA DE LA RED

- Estocabilidad en los recursos.
- Cambio de modo isla a conectada a la red.
- Cambio de baterías
- Estabilidad de la micro-red.
- Calidad de la energía.
- Control de la micro-red.
- Políticas y marcos regulatorios.
- Generación renovable como la eólica y solar conectada por convertidores de potencia, que por lo general trabajan en MPPT. Tienen un bajo o nulo aporte de inercia en el sistema ante desbalances entre generación-demanda.

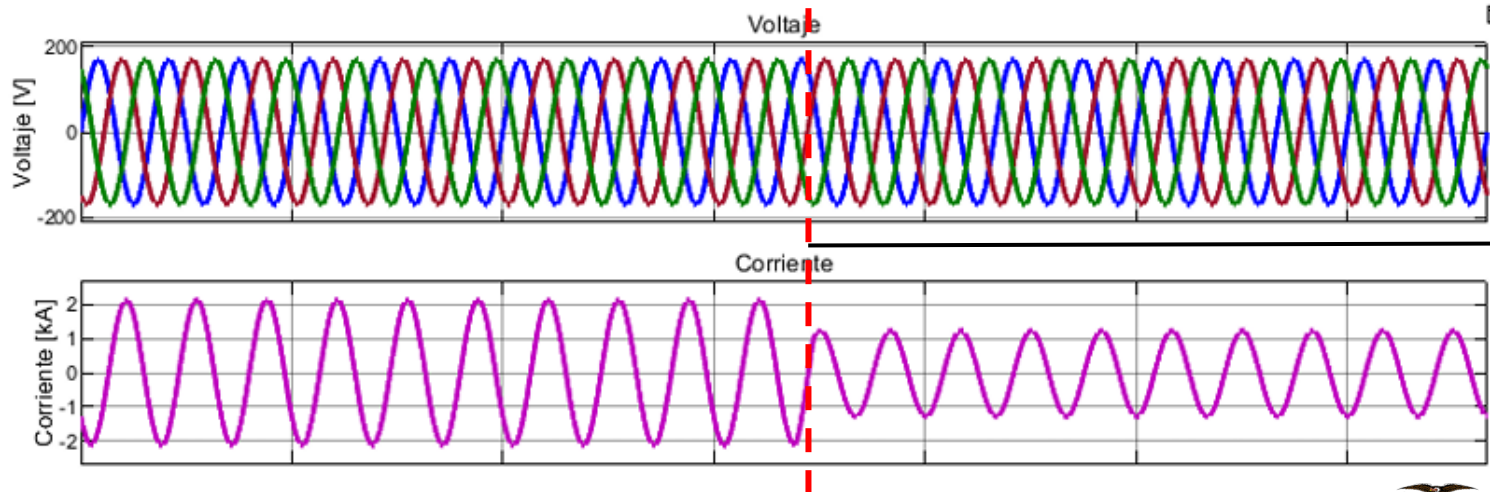


## CONTROL DE MICRO-REDES

- Los convertidores **formadores de red (GRID FORMING)** pueden generar un control primario local, emulando la estructura de control primario de frecuencia en sistemas de potencia.
- Los convertidores **seguidores de red (GRID FOLLOWING)** solo se sincronizan a la frecuencia dada por la red principal.

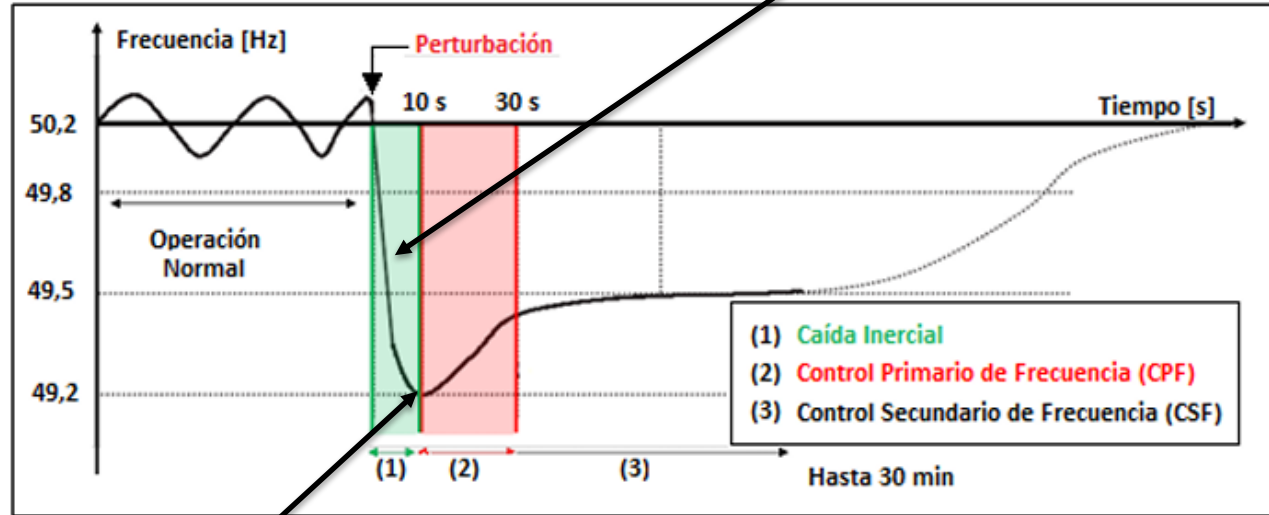


a) Grid following b) Grid forming



Desconexión de la Red

## CONTROL DE FRECUENCIA



RoCoF

Ecuación RoCoF tras una contingencia

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_0 * \Delta P}{2 * H_{sys}}$$

$H_{sys}$  = Constante de inercia del sistema.

$f_0$  = Frecuencia previa a la contingencia

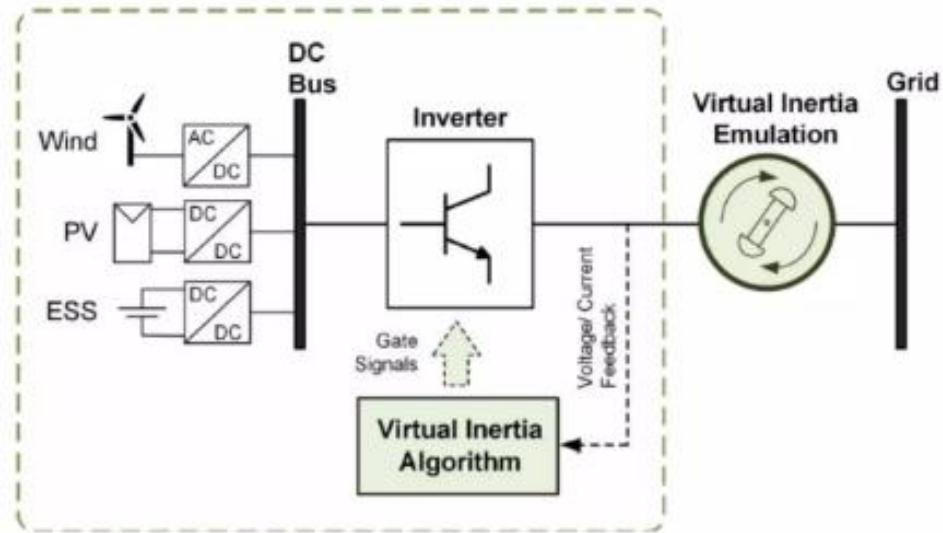
## FRECUENCIA DE NADIR

Es el valor mínimo que toma la frecuencia en un sistema eléctrico, posterior a un desbalance de potencia entre carga y generación, cuando existe la primera oscilación de frecuencia.



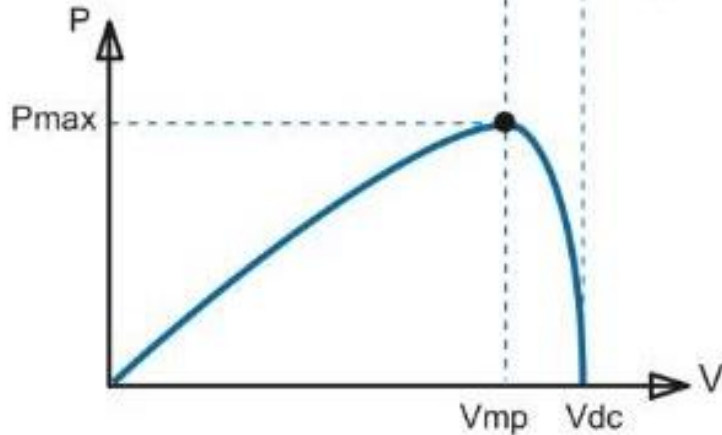
## Inercia Sintética

- ✓ La inercia sintética se da a raíz de la alta inserción de generación renovable basada en inversores que no poseen un aporte de inercia al sistema ante desbalances entre generación y demanda, comprometiendo la estabilidad de frecuencia del sistema.
- ✓ Busca emular el comportamiento de los gobernadores de las máquinas síncronas cuando detectan perturbaciones en el sistema, llamándoles a inyectar energía cinética almacenada en el rotor de la máquina, para brindar soporte en la frecuencia del sistema.

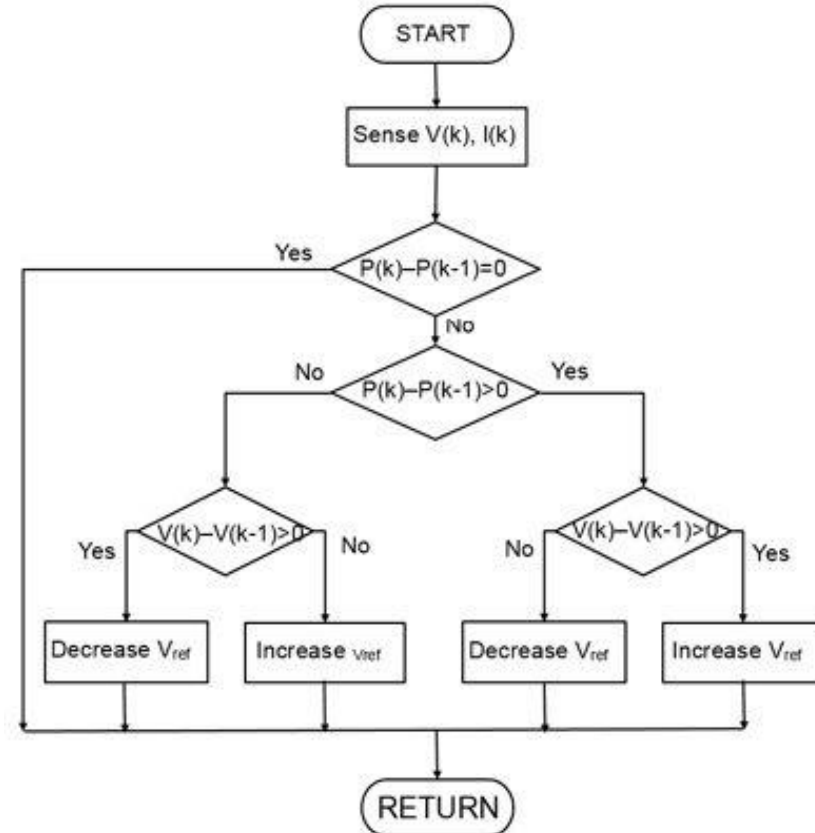


## MPPT EN LOS INVERSORES

Se obtiene el punto de máxima potencia, mediante la variación del ciclo útil del convertidor.

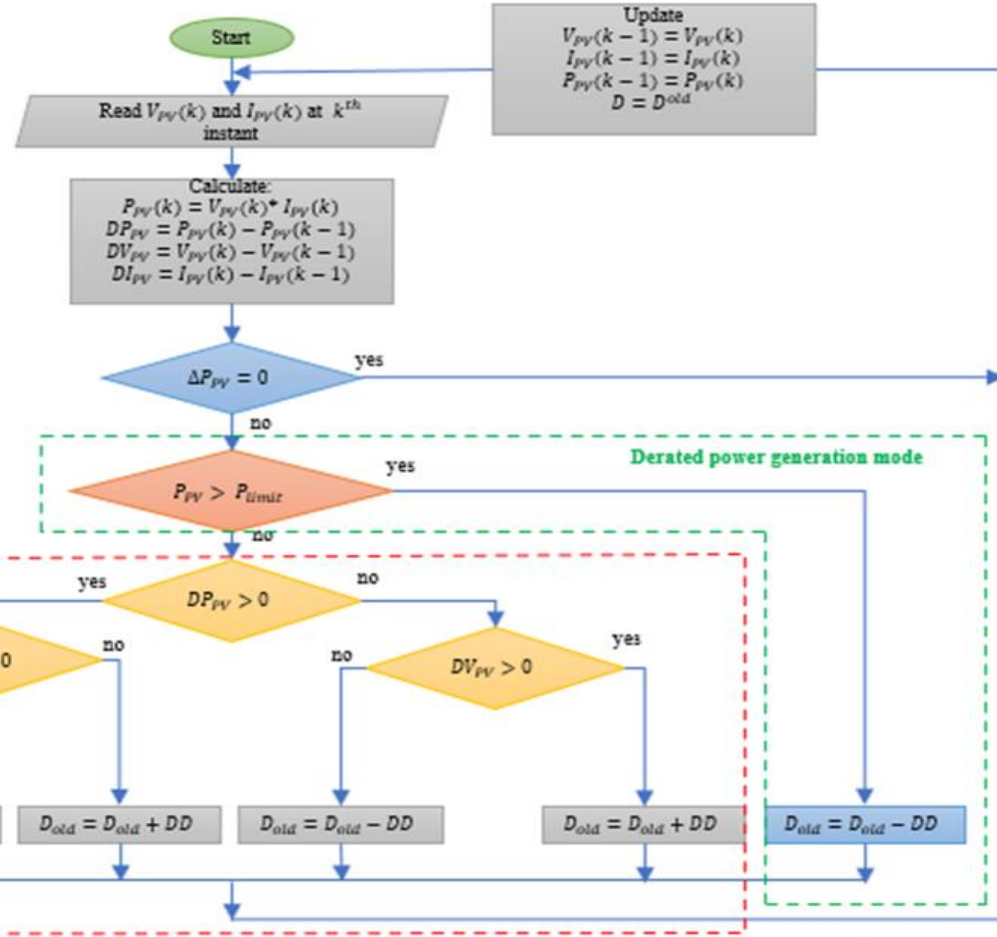
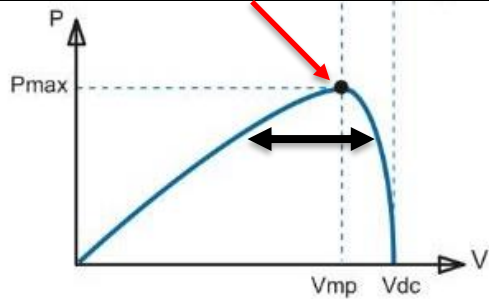


- En los sistemas fotovoltaicos, a cualquier nivel de radiación solar, existe un único punto en la característica de voltaje vs corriente de los paneles, en el que se genera la máxima potencia; ese es el punto donde el control basado en MPPT desea trabajar para generar energía.



## Algoritmo Derrateo

Se puede cambiar el punto de máxima transferencia de potencia, mediante la variación del ciclo útil del convertidor, moviéndolo hacia la izquierda o derecha. "Con el propósito de que se pueda almacenar energía para ser usada cuando el sistema lo requiera"



# AGENDA

- ANTECEDENTES
- MARCO TEÓRICO
- OBJETIVOS
- METODOLOGÍA
- CASO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES

# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

Modelar una micro-red aislada conformada por un sistema fotovoltaico implementando un sistema de control MPPT y una granja eólica que posee un sistema de control para emular inercia para contribuir al control primario de frecuencia con el objetivo de minimizar la degradación de los equipos BESS.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS



Modelar un sistema fotovoltaico con un regulador MPPT para la obtención de su máxima potencia



Modelar un sistema eólico con un sistema de control para emular inercia con el propósito de participar en la regulación primaria de frecuencia



Validar el modelo de la planta fotovoltaica y de la turbina eólica ante condiciones de desequilibrio



Realizar simulaciones en el dominio del tiempo para validar los algoritmos de control implementados y verificar que la planta eólica participa de la respuesta primaria de frecuencia



# AGENDA

- ANTECEDENTES
- MARCO TEÓRICO
- OBJETIVOS
- **METODOLOGÍA**
- CASO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES

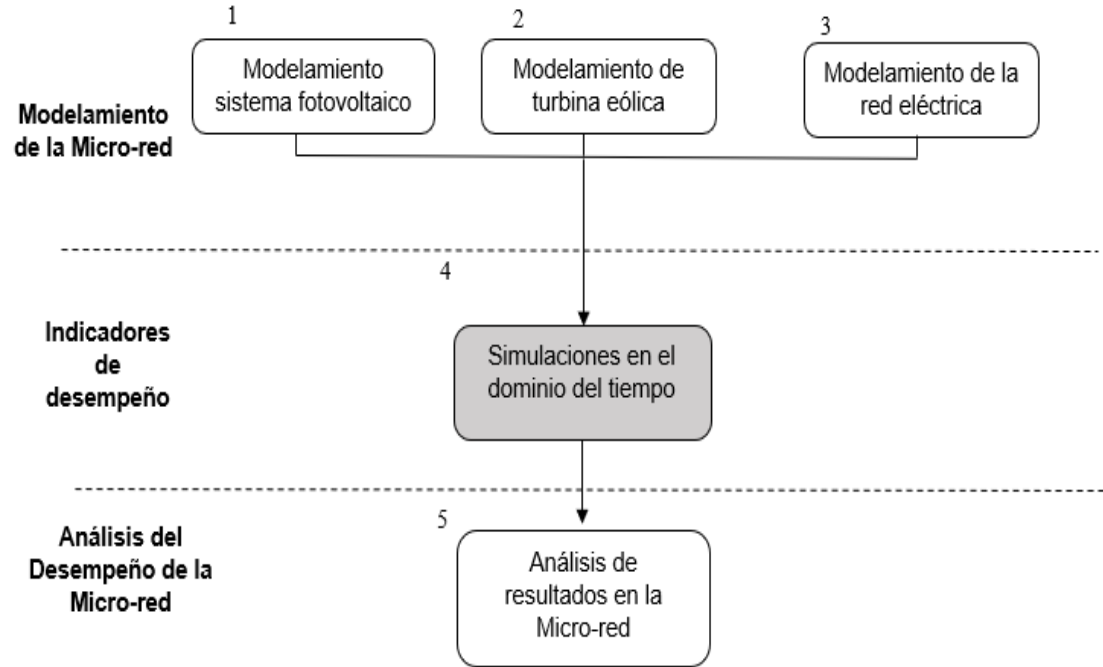
# METODOLOGÍA

## MODELAMIENTO DE LA MICRO-RED

Se modela y diseña la planta fotovoltaica, turbina eólica que conforma la micro-red aislada, la información proporcionada sirve para analizar la capacidad de respuesta primaria de frecuencia

**1. Sistema Fotovoltaico:** Para modelar la planta fotovoltaica se debe considerar el nivel de irradiancia del lugar a instalar y la demanda eléctrica, en base a esos valores se determina el número de paneles a modelar, teniendo también en cuenta el modelo detallado.

**2. Turbina Eólica:** Se debe tomar en cuenta el tipo de turbina, la velocidad del viento del lugar en donde se va a implementar y la carga a la que se la va a conectar.



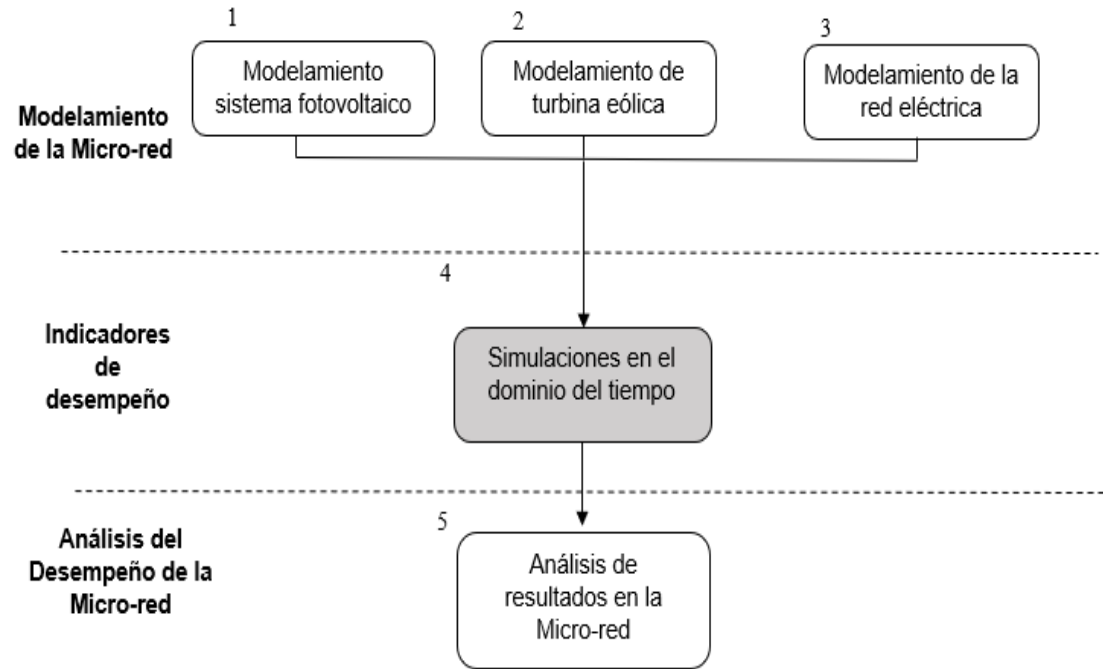
# METODOLOGÍA

**3. Modelamiento de la red eléctrica:** Una vez modelada las unidades de generación, se procede con el modelamiento de las líneas de transmisión para unificarlas con sus respectivos convertidores de potencia trabajando en conjunto conectados a la misma carga.

## INDICADORES DE DESEMPEÑO

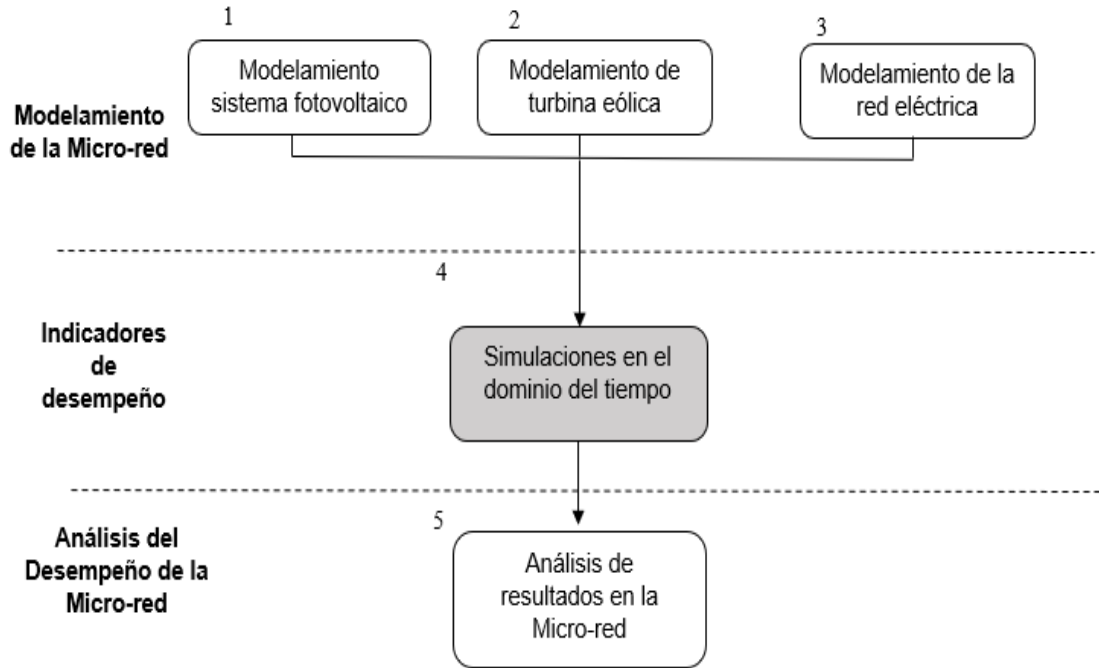
Se somete a la micro-red a desbalances de carga, en donde se pueda analizar el desempeño de los convertidores ante las variaciones de carga.

**4. Simulaciones en el dominio del tiempo:** Se establecen los escenarios con grandes variaciones de carga midiendo valores de voltaje y frecuencia, en donde se observa el desempeño de las estrategias de control implementadas para hacerle frente a la contingencia ocurrida.



## ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA MICRO-RED

**5. Análisis de resultados y desempeño de los convertidores:** Al realizar una variación de carga los convertidores actúan para evitar la caída de frecuencia con el uso de los algoritmos de control recuperando la estabilidad en menos de 0.1 segundos, con un error en estado estacionario aproximado de 0.



# AGENDA

- ANTECEDENTES
- MARCO TEÓRICO
- OBJETIVOS
- METODOLOGÍA
- CASO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES

# CASO DE ESTUDIO

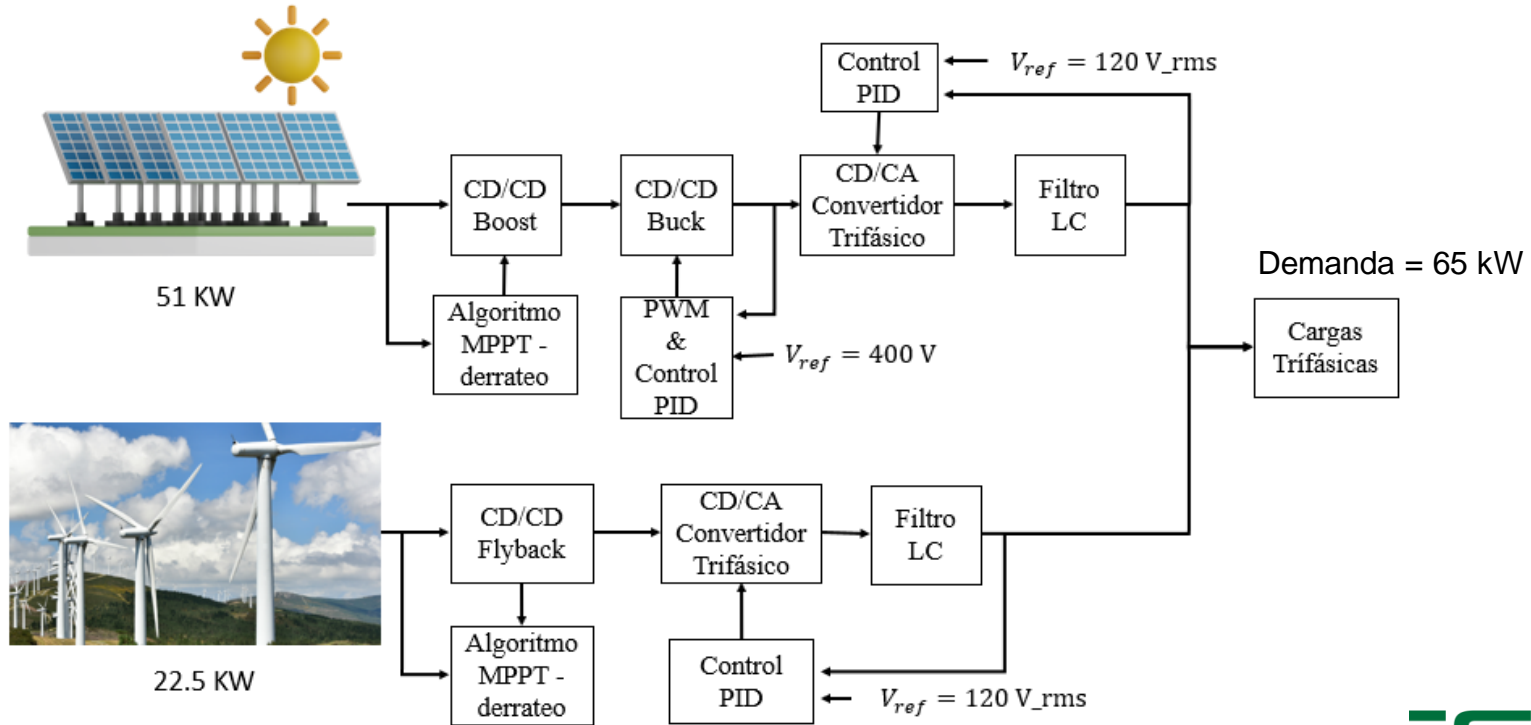
- Para el caso de estudio se utiliza un arreglo de paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas, como se muestra en la siguiente tabla:

Planta Fotovoltaica	Planta Eólica
$Potencia_{panel} = 213 \text{ Watts}$	$Potencia_{Turbina} = 7.5 \text{ kW}$
$Paneles \text{ en serie} = 10$ $Paneles \text{ en paralelo} = 24$	$Total \text{ turbinas} = 3$
$Potencia_{total} = 51,15 \text{ kW}$	$Potencia_{total} = 22,5 \text{ kW}$
$Irradiacion = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$Velocidad_{viento} = 12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$



# CASO DE ESTUDIO

- El diagrama de bloque de la micro-red, con sus respectivos convertidores y algoritmos de derrateo se muestran en la siguiente figura:



# AGENDA

- ANTECEDENTES
- MARCO TEÓRICO
- OBJETIVOS
- METODOLOGÍA
- CASO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES



# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## ESCENARIOS DE SIMULACIÓN - GENERACIÓN EÓLICA Y FOTOVOLTAICA

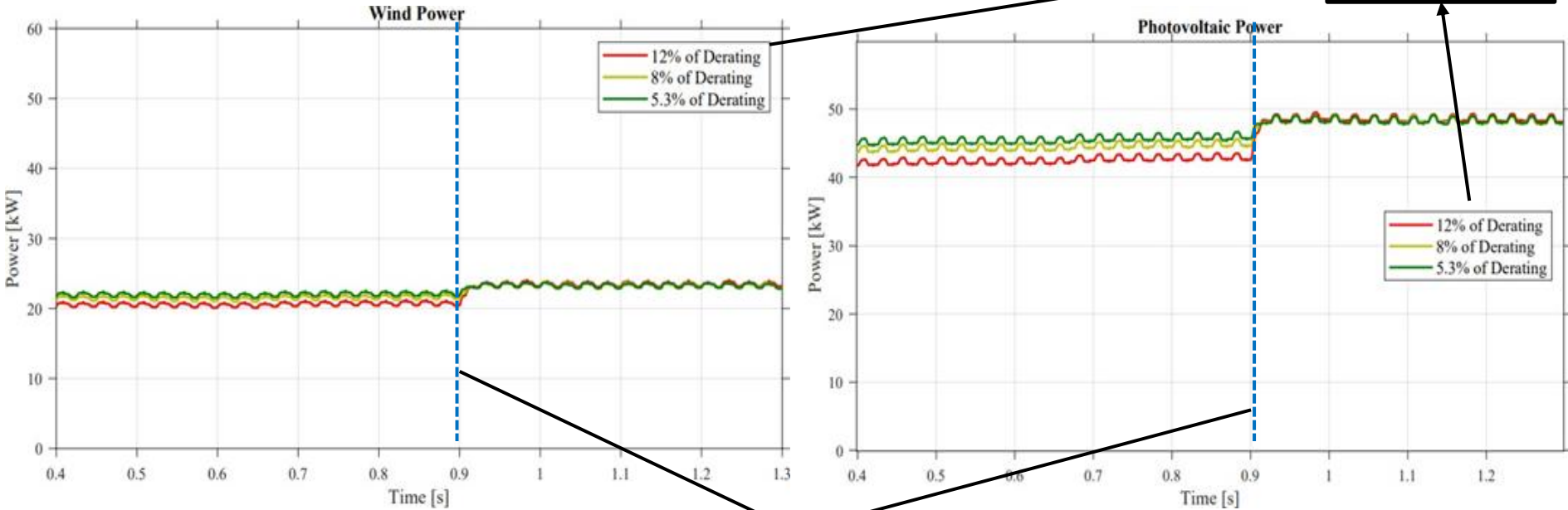
- Los escenarios de simulación a los que se encuentra sometida la micro-red, conformada por la planta de generación eólica y fotovoltaica, con sus respectivas variaciones de potencia, se presentan a continuación:

Escenario	Potencia Pre contingencia [kW]		$\Delta$ Potencia [kW]		Potencia Post contingencia [kW]		Derrateo Usado
	Eólica	Fotovoltaica	Eólica	Fotovoltaica	Eólica	Fotovoltaica	
1	18.810	43.301	+2.565	+5.905	21.375	49.206	5.3%
2	19.601	45.122	+1.774	+4.084	21.375	49.206	8%
3	20.306	46.746	+1.069	+2.406	21.375	49.152	12%

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## POTENCIA DE LA PLANTA EÓLICA Y LA PLANTA FOTOVOLTAICA

Porcentaje de derrateo usado

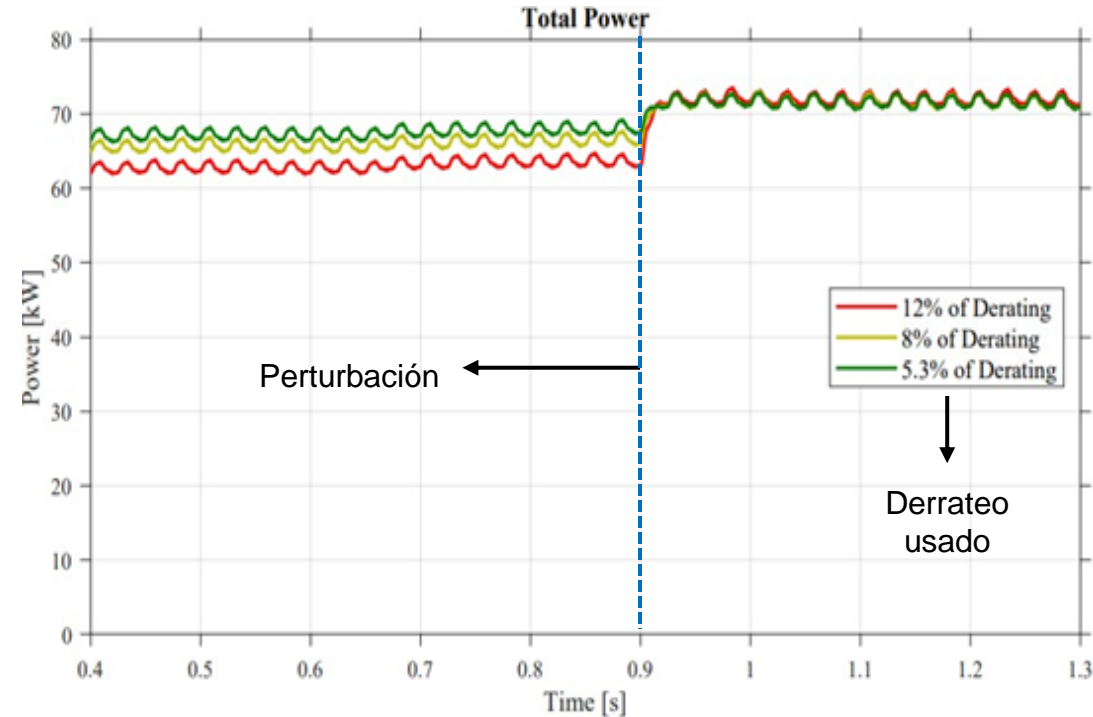


La perturbacion se la realiza en el segundo 0.9 al realizar la variación de la potencia

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## POTENCIA TOTAL DE LA MICRO – RED

- La potencia total de la micro-red es la suma de las plantas, eólica y fotovoltaica, como se muestra en el gráfico y la tabla siguiente:



Escenario	Potencia Pre contingencia [kW]	$\Delta$ Potencia [kW]	Potencia Post contingencia [kW]
1	62.111	+8.470	70.581
2	64.723	+5.858	70.581
3	67.052	+3.475	70.527

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## FRECUENCIA Y VOLTAJE DE LA MICRO – RED

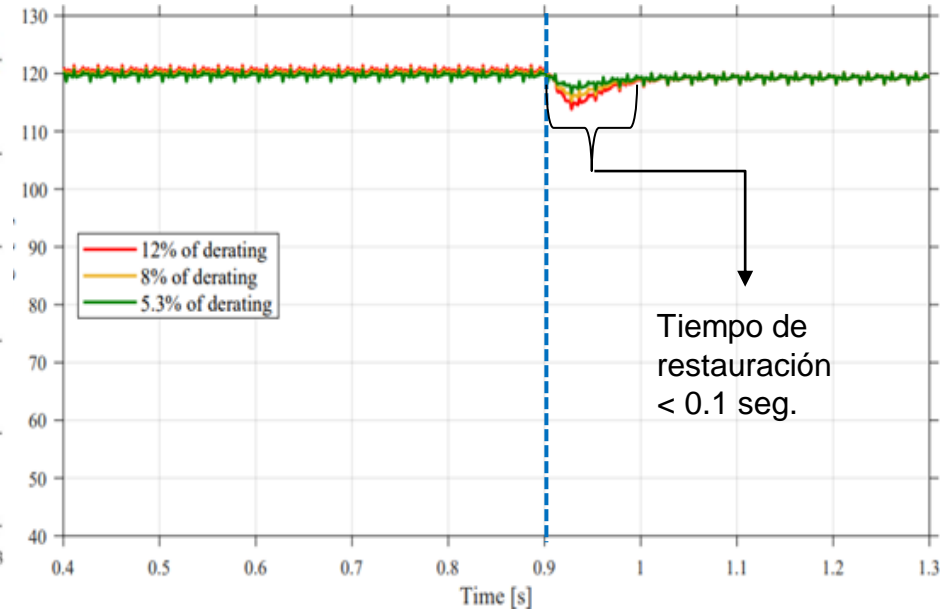
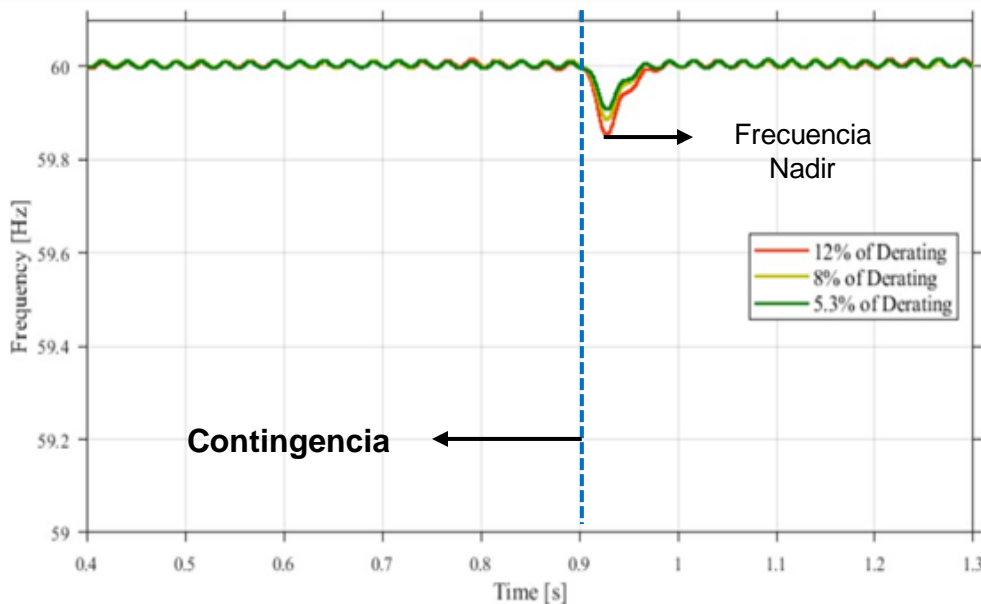
- La siguiente tabla muestra un resumen de los valores de la frecuencia y el voltaje pre/ post contingencia de la micro – red y la variación que tuvo ante las variaciones de carga.

Escenarios	Frec. Pre contingencia [Hz]	$\Delta$ Frec. [Hz]	Frec. Nadir [Hz]	Frec. Post contingencia [Hz]	Voltaje Pre contingencia [V]	$\Delta$ de Voltaje [V]	Voltaje mínimo [V]	Voltaje Post contingencia [V]
1	60.01	-0.146	59.864	60.01	120.821	-1.872	118.95	119.724
2	60.01	-0.113	59.897	60.01	120.124	-2.934	117.19	119.724
3	60.01	-0.091	59.919	60.01	120.011	-4.221	115.79	119.724

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## FRECUENCIA Y VOLTAJE DE LA MICRO – RED

- La frecuencia de la micro – red sufre una caída al someterla ante la variación de carga, para posteriormente mediante el uso del algoritmo de derrateo realizar un control de frecuencia primario



# AGENDA

- ANTECEDENTES
- MARCO TEÓRICO
- OBJETIVOS
- METODOLOGÍA
- CASO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES

# CONCLUSIONES

- Esta investigación demostró que las unidades de energía renovable, como los aerogeneradores y generadores fotovoltaicos, participan en la respuesta primaria de frecuencia teniendo en cuenta el sistema de reducción de potencia a nivel de los convertidores CC-CC y CC-CA, lo que podría minimizar el uso de los equipos BESS aumentando su vida útil.
- Las variaciones en la demanda de potencia y la intermitencia de los recursos naturales requieren que los controladores de frecuencia proporcionen una respuesta rápida para reducir las variaciones de frecuencia. El esquema de control (power derating) permite emular la inercia en una micro-red aislada basada en convertidores de potencia mejorando la capacidad de respuesta del sistema frente a las variaciones de carga y obteniendo un control óptimo de la frecuencia. La respuesta del sistema en los casos de estudio presentados es inferior a 0,1 segundos, evitando descargas profundas de los BESS. De este modo, la vida útil de los BESS no se ve afectada.

# CONCLUSIONES

- El control de la potencia de derrateo presentado en este trabajo de investigación permite evitar incurrir en costes de sustitución anticipada asociados a la sustitución de los equipos BESS.



# AGENDA

- ANTECEDENTES
- MARCO TEÓRICO
- OBJETIVOS
- METODOLOGÍA
- CASO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES

# RECOMENDACIONES

- Se recomienda la inserción de otra fuente de generación renovable para tener una micro-red eléctrica más robusta al momento de que se presenten variaciones altas de demanda.
- Realizar un estudio técnico-económico de los controladores que se utiliza en el sistema Fotovoltaico y en la planta eólica para el despacho de energía (activos/reactivos) e incorporar funcionamiento tipo grid-forming.

*¡Gracias!*

