

**ÓPTIMO CONTROL DE FRECUENCIA APLICADO A UNA MICRO-RED  
EÓLICA CON GENERADORES DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE  
ALIMENTADOS USANDO EL ALGORITMO DE HARRIS HAWKS**





**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ÓPTIMO CONTROL DE FRECUENCIA APLICADO A UNA MICRO-RED  
EÓLICA CON GENERADORES DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADOS  
USANDO EL ALGORITMO DE HARRIS HAWKS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: ERICK ANDRÉS CUMBAL HERNÁNDEZ  
TUTOR: CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA

Quito - Ecuador  
2023

Erick Andrés Cumbal Hernández

**ÓPTIMO CONTROL DE FRECUENCIA APLICADO A UNA MICRO-RED EÓLICA CON GENERADORES DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADOS USANDO EL ALGORITMO DE HARRIS HAWKS.**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2023

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Erick Andrés Cumbal Hernández** (Y'1996 – M'11). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Nacional “Nicolas Jiménez” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el óptimo control de frecuencia aplicado a una micro-red eólica con generadores de inducción doblemente alimentados usando el algoritmo de Harris Hawks. [ecumbal@est.ups.edu.ec](mailto:ecumbal@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Carlos Andrés Barrera Singaña** (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en 2013. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Zaragoza, España, donde obtuvo el título en Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética con Especialidad en Sistemas Eléctricos. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. [cbarrera@ups.edu.ec](mailto:cbarrera@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

©2023 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Erick Andrés Cumbal Hernández con documento de identificación No. 1725290249 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 16 de enero del año 2023

Atentamente,



Erick Andrés Cumbal Hernández  
1725290249

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Erick Andrés Cumbal Hernández con documento de identificación No. 1725290249, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Óptimo Control de Frecuencia Aplicado a una Micro-red Eólica con Generadores de Inducción Doblemente Alimentados Usando el Algoritmo de Harris Hawks”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 16 de enero del año 2023

Atentamente,



Erick Andrés Cumbal Hernández

1725290249

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña con documento de identificación No. 0503503336, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **ÓPTIMO CONTROL DE FRECUENCIA APLICADO A UNA MICRO-RED EÓLICA CON GENERADORES DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADOS USANDO EL ALGORITMO DE HARRIS HAWKS**, realizado por Erick Andrés Cumbal Hernández con documento de identificación No. 1725290249, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 16 de enero del año 2023

Atentamente,



---

Ing. Carlos Andrés Barrera Singaña, Mst  
0503503336

## ÍNDICE GENERAL

1	Introducción .....	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Micro-redes .....	3
2.1.1	Micro-red Eólica .....	3
2.1.2	Micro-red Eólica conectada y desconectada a la red.....	3
2.1.3	Arquitectura de una micro-red .....	3
2.2	Estabilidad de Frecuencia.....	4
2.2.1	Balance entre generación y carga. ....	4
2.2.2	Respuesta de la Carga con la Frecuencia.....	5
2.2.3	Regulación primaria de frecuencia. ....	5
2.2.4	Regulación secundaria de frecuencia. ....	6
2.2.5	Regulación terciaria de frecuencia.....	6
2.3	Generador Sincrónico.....	6
2.3.1	Ecuación de Oscilación.....	6
2.3.2	Generador Doblemente Alimentado [DFIG] .....	6
2.3.3	Modelación dinámica de DFIG .....	7
2.4	Controlador PID de Frecuencia. ....	8
2.4.1	Estado Estacionario.....	8
2.4.2	Estado Transitorio.....	8
2.4.3	Respuesta Transitoria y Respuesta Estable. ....	8
2.4.4	Función de Transferencia.....	9
2.5	Optimización de HHO.....	9
2.5.1	Antecedentes.....	9
2.5.2	Fase de Exploración en HHO. ....	10
2.5.3	Fase de Explotación en HHO .....	10
2.5.4	Persecución brusca del halcón de Harris. ....	10
2.5.5	Persecución Suave del halcón de Harris. ....	11
2.5.6	Persecución suave con inmersión rápida progresiva. ....	11
2.5.7	Persecución brusca con inmersión rápida progresiva. ....	11
3	Formulación del problema.....	12
3.1	Sistema base – Modelo IEEE 39 barras.....	12
3.1.1	Modelación de la Micro-red .....	13
3.2	Método de Solución y Modelación matemática de HHO. ....	13
3.2.1	Flujo de potencia – frecuencia.....	14



4	Análisis de resultados .....	14
4.1	Caso de Estudio .....	14
4.1.1	Generadores síncronos del sistema IEEE 39 barras.....	15
4.1.2	Generadores DFIG – Modelo Agregado.....	16
4.1.3	Curva de convergencia de Harris Hawks.....	16
4.2	Respuesta Óptima de frecuencia .....	17
4.2.1	Respuesta de balance entre generación (DFIG) y carga - Caso 1 ..	17
4.2.2	Respuesta de balance entre generación (DFIG) y carga - Caso 2 ..	17
4.2.3	Respuesta de balance entre generación (DFIG) y carga - Caso 3 ..	18
4.2.4	Respuesta a $\Delta$ de Frecuencia Optima.....	19
5	Conclusiones.....	19
5.1	Trabajos futuros.....	20
6	Referencias.....	20
6.1	Matriz de Estado del Arte.....	23
6.1	Resumen de indicadores .....	29
7	Anexos.....	30

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura de una micro-red [autor]. .....	4
Figura 2. Balance de generación y Carga en estado normal [autor]. .....	4
Figura 3. Balance de generación y Carga en estado acelerado. ....	4
Figura 4. Balance de generación y Carga en estado desacelerado. ....	5
Figura 5. Lazo cerrado del sistema de respuesta de carga .....	5
Figura 6. Tiempo – Control de frecuencia. ....	5
Figura 7. Aerogenerador con sistema doblemente alimentado [autor]. ....	7
Figura 8. Diagrama de bloques – esquema convencional por retroalimentación. [autor] .....	8
Figura 9. Diagrama de bloques – esquema del controlador PID – ecuación (17) .....	9
Figura 10. Principio de Optimización de Harris Hawks. [autor]. ....	9
Figura 11. Fase de Exploración en HHO. ....	10
Figura 12. Fase de Explotación 1 en HHO – estrategias de persecución. ....	10
Figura 13. Fase de Explotación 2 en HHO – estrategias de persecución. ....	11
Figura 14. Modelo de prueba IEEE de 39 barras. [autor]. ....	12
Figura 15. Modelo dinámico agregado al sistema IEEE de 39 barras. ....	13
Figura 16. Modelo dinámico agregado al sistema IEEE de 39 barras. [autor]. ....	13
Figura 17. [W] de los generadores en IEEE de 39 barras. ....	15
Figura 18. Respuesta de [W] ante falla en el sistema. ....	15
Figura 19. Ángulo de los generadores del sistema. ....	16
Figura 21. Balance entre generación y carga – caso 1. ....	17
Figura 22. Datos de Frecuencia – caso 1. ....	17
Figura 23. Balance entre generación y carga – caso 2. ....	18
Figura 24. Datos de Frecuencia – caso 2. ....	18
Figura 25. Balance entre generación y carga – caso 3. ....	18
Figura 26. Datos de Frecuencia – caso 3. ....	19
Figura 27. $\Delta$ de Frecuencia en estado estable. ....	19
Figura 28. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte. ....	29
Figura 29. Indicador de formulación del problema - Estado del arte. ....	29
Figura 30. Indicador de solución - Estado del arte. ....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipologías de operación en las micro-redes .....	4
Tabla 2. Datos de Magnitud de voltaje en IEEE 39 barras.....	13
Tabla 3: Excitación de generadores del sistema.....	15
Tabla 4: Datos de operación de generadores del sistema .....	15
Tabla 5: Datos de variación de Frecuencia – caso 1.....	17
Tabla 6: Datos de variación de Frecuencia – caso 2.....	18
Tabla 7: Datos de variación de Frecuencia – caso 3.....	19
Tabla 8: Minimización de $\Delta$ en frecuencia. ....	19
Tabla 8. Datos de Generación IEEE de 39 barras, DFIG .....	30
Tabla 9. Datos de Máquinas Síncronas, DFIG. ....	30
Tabla 10. Datos de cargas del sistema IEEE de 39 barras con Micro-red, DFIG. ....	30

# ÓPTIMO CONTROL DE FRECUENCIA APLICADO A UNA MICRO-RED EÓLICA CON GENERADORES DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADOS USANDO EL ALGORITMO DE HARRIS HAWKS

## Resumen

Los límites del rango real de la variación de frecuencia ( $\Delta f$ ) en los sistemas eléctricos de potencia (SEP), su objetivo es obtener valores llegando al rango ideal es decir 60 Hz después de haber sufrido alguna perturbación, es por esto, por lo que en el presente documento se pretende optimizar el control de los generadores de inducción doblemente alimentados los cuales forman la micro-red, dicho control será el encargado en el balance de la generación y la demanda. Las restricciones del modelo de optimización de Harris Hawks analizan los valores de la velocidad síncrona de las máquinas haciendo referencia a esta como el halcón estimando así su aceleración o desaceleración con el fin de dar respuesta a la demanda del sistema (conejo), que en cierto tiempo de simulación se provocó un cortocircuito trifásico en una L/T y adicional a eso las cargas tenían un incremento del 0.05[%], brindado datos favorables y cumpliendo con la función objetivo la cual es minimizar la variación de frecuencia.

**Palabras Clave:** Optimización, Frecuencia Micro-Red, Generadores DFIG, HHO.

## Abstract

The limits of the real range of the frequency variation ( $\Delta f$ ) in the power electrical systems, its objective is to obtain values reaching the ideal range that is 60 Hz after having suffered some disturbance, that is why, in the present document it is intended to optimize the control of the doubly-fed induction generators which form the micro-grid, this control will be in charge of the generation and demand balance. The restrictions of the Harris Hawks optimization model analyze the values of the synchronous speed of the machines making reference to this as the hawk thus estimating its acceleration or deceleration in order to respond to the demand of the system (rabbit), that in certain simulation time a three-phase short circuit was caused in a L/T and in addition to that the loads had an increase of 0.05[%], providing favorable data and complying with the objective function which is to minimize the frequency variation.

**Keywords:** Optimization, Microgrid, Frequency, DFIG Generators, HHO.

# 1 Introducción

La estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia (SEP) [1] es constantemente monitoreada por motivos del impacto en el sector energético al ser considerada muy volátil y variante, debido al incremento de fallas, perturbaciones y balance entre generación y la demanda [2].

El monitoreo por parte de la generación es dependiente en gran parte en la utilización de energéticos convencionales, [2] es decir, el petróleo en las unidades de generación térmica. Esto hace que, al momento de realizar un estudio de contingencias arrojé resultados, calificándose dentro de un grado de incertidumbre según [3] este adjetivo calificativo es por motivo que dichas unidades salen de operación o entran en modo de mantenimiento.

El crecimiento de la población en los últimos años hace que el incremento de la demanda energética, como comercial, residencial o industrial [3], [4], sea considerablemente alta y el aumento de los costos de operación [5] y costos del energético sea igual altos [6], siendo índices de problemáticas claves para optar por nuevas ideas y/o proyectos netamente basados en la utilización de energías renovables que ayuden o compensen el sistema [2], [5].

Desde un enfoque político de las autoridades que gestionan la generación de energía [3], [7] están en la obligación de brindar soluciones factibles a largo plazo ante el aumento y constante uso de las unidades generadoras en la cual su energético es el diésel [8], Las soluciones en base a análisis técnicos aportan de manera directa a la demanda con el uso de energías limpias como es el viento [9], en [3], [7] hace referencia a la región sur y a la región insular del continente ecuatoriano en la cual tiene la mayoría el uso de esta energía.

El tema principal para tratar en esta investigación es la variación de la frecuencia [10], [11] alejadas del valor nominal ya que está técnicamente provoca el deterioro de diversos equipos eléctricos.

Es por esto, que una operación satisfactoria de la frecuencia debe permanecer dentro del rango constante teniendo en cuenta la parte ideal de la parte real [12].

El modelo de prueba o sistema base que se implementó en las simulaciones consta de diez generadores síncronos más el modelo agregado (micro-red eólica DFIG) [13], por lo que la velocidad de giro se asocia a la frecuencia.

El sincronismo de estas transforman la energía mecánica en energía eléctrica y la potencia de las mismas es consumida por la demanda [14], la cual cambia continuamente durante las 24 horas del día, es por ello que se requiere un control que ajuste automáticamente precautelando no pasar los límites de frecuencia  $[\Delta f]$  [14].

Se asume que el control de frecuencia recae en tres principales regulaciones [1], [15], por ejemplo el lazo de control primario, lazo de control secundario y lazo de control terciario de la frecuencia, cada una de ellas con el rango en tiempo de operación, así cuando exista algún desbalance se pueda corregir en el instante de tiempo [16].

La micro-red eólica [17] para cumplir el objetivo en la colaboración de la inyección de potencia activa al sistema cuando este lo requiera debe pasar por una gestión energética en base a metodologías estocásticas o de inteligencia artificial [18].

La técnica de gestión en esta investigación científica es la optimización metaheurística de los halcones de Harris aplicados al control [19].

Dentro de los antecedentes de la metodología hace referencia a la naturaleza de caza de los halcones [20] se tiene en cuenta que, para este caso de estudio, el halcón de Harris viene siendo la micro-red y el conejo o presa toma lugar de las cargas del sistema.

La metodología que utiliza el HHO [21], se basa en dos fases principales, la fase exploratoria en la cual se asume un flujo de potencia del sistema y un análisis de contingencia con el fin de encontrar problemas. la fase de explotación se deriva en cuatro modalidades o estrategias de ataque, para lo cual el óptimo control de la micro-red eólica está preparada para compensar en algún momento dado [18]. Las simulaciones constan de algunas fallas provocadas, por ejemplo, un cortocircuito trifásico franco en una línea de transmisión, adicional a eso un incremento de un 0.05[%] a todas las cargas del sistema con el fin de analizar cómo se comporta el sistema teniendo en cuenta su óptimo resultado en la minimización de la función objetivo.

## **2 Marco teórico**

Los avances investigativos en los sistemas eléctricos han tenido un gran impacto con respecto a la energía renovable es por ello por lo que se hace énfasis a todo lo relacionado con el tema.

### **2.1 Micro-redes**

Las micro-redes a nivel global son comprendidas como, el conjunto de una o varias cargas relativamente pequeñas en baja tensión [5], en coordinación con el área de generación distribuida, con el fin de operar como un solo sistema de potencia [2].

Las mismas que en la actualidad son una alternativa con enfoque renovable, ambiental y futurista, la cual fomentan una

independencia del servicio energético, esta a su vez dependerá de la configuración en tiempo real que se encuentre [5].

#### **2.1.1 Micro-red Eólica**

A esta generación de energía se las denomina limpias por motivo que su energético es el viento [8], y se aprovecha el movimiento cinético de los aerogeneradores para pasar de una energía mecánica a la energía eléctrica [22].

#### **2.1.2 Micro-red Eólica conectada y desconectada a la red.**

En esta operación la red proporcionara los márgenes admisibles de tensión y frecuencia [22], para que no ocurra ningún problema de estabilidad [8].

Esta configuración es también un mecanismo de emergencia, ante perturbaciones del sistema, ya que puede desconectarse de la red protegiendo sus elementos.

Tomando en cuenta que está conectado a la red principal, también puede trabajar de forma aislada del sistema cumpliendo con todos los estándares [2].

La infraestructura de comunicación de las micro-redes es uno de los pilares fundamentales [2], tomando en cuenta una jerarquía ante una gestión de control del almacenamiento de energía, este a su vez tiene las características de ser inteligente para asumir el control de cargas y consumos [22].

#### **2.1.3 Arquitectura de una micro-red**

Se compone de un control descentralizado con la configuración de conexión de tipo radial o mallado con el objetivo de mantener los niveles de oferta y demanda en constante equilibrio [8], [22].

Tabla 1: Tipologías de operación en las micro-redes.

Tipologías de una micro-red	
Micro-redes de AC	Micro-redes de DC
Tipologías en la Arquitectura de las Micro-redes	
Arquitectura de control centralizada.	
Arquitectura de control descentralizada.	
Arquitectura de control jerárquica.	

En todo estado de operación para llegar a una eficiencia óptima se deben tratar algunos estados críticos del sistema como:

- Controladores locales con respuesta rápida para precautelar los recursos distribuidos.
- El optimizador para el correcto manejo de energía.
- Las protecciones ante eventos de falla [8].

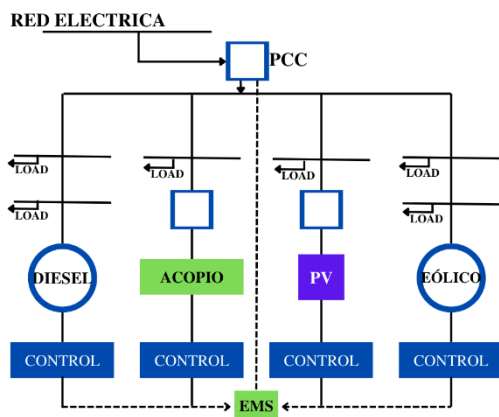


Figura 1. Arquitectura de una micro-red [autor].

## 2.2 Estabilidad de Frecuencia

El sistema centralizado o la Micro-red [15], consta de características propias para esta investigación en la cual se enfatiza que cumpla con todos los estándares de calidad orientados a la frecuencia.

Las perturbaciones o desbalances entre generación y carga, son los diferentes escenarios que se va a poder analizar, ya sea de respuesta en corto plazo o largo plazo de su estabilidad y todo eso gracias al tipo de control que este implementado [1].

El sistema ecuatoriano se basa en un estándar y normativa [15], que adjunta a la frecuencia de 60 Hz, como su valor nominal ideal.

### 2.2.1 Balance entre generación y carga.

Las micro-redes o todo sistema eléctrico de potencia bajo condiciones normales existen un balance [12] como se observa en la figura 2, teniendo en cuenta su frecuencia nominal.

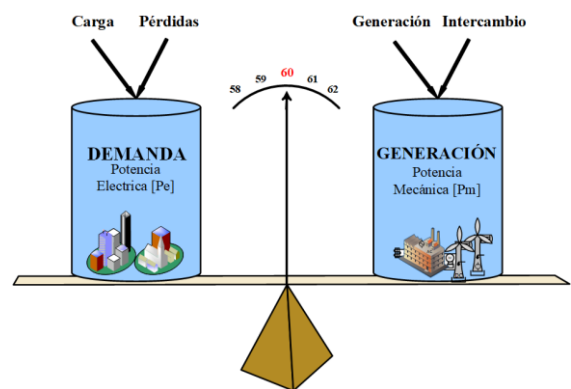


Figura 2. Balance de generación y Carga en estado normal [autor].

La demanda juega un papel importante en esta sección, al tener una pérdida considerable, dicho sistema acelera la velocidad angular de la parte generadora lo que provoca un incremento en la frecuencia, observando la figura 3 se analiza dicho caso [12].

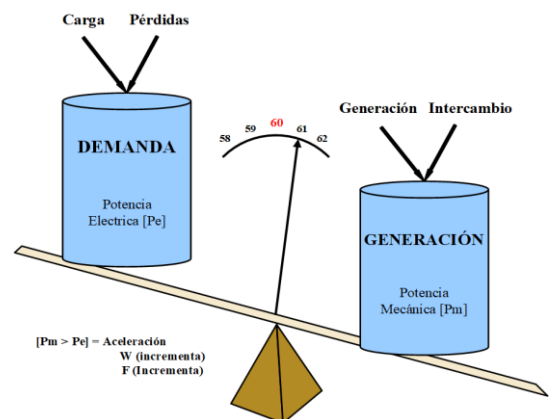


Figura 3. Balance de generación y Carga en estado acelerado.

Ahora se analiza el caso contrario en la figura 4, Tomando en cuenta que los niveles de carga sufren un incremento, provocando que la parte generadora desacelere su par mecánico y por consiguiente un decremento en su frecuencia [12].

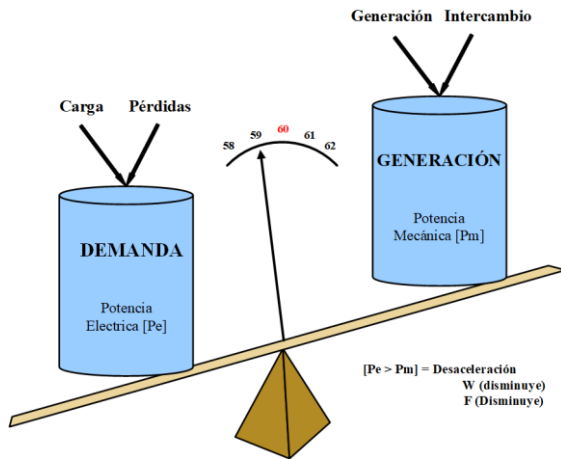


Figura 4. Balance de generación y Carga en estado desacelerado.

### 2.2.2 Respuesta de la Carga con la Frecuencia.

Es de conocimiento general que, en el SEP, se encuentra el intercambio controlado de generación y demanda. Dando como resultado que si cambia la frecuencia es porque responden a la variación del flujo de potencia. Dicha respuesta de la carga se expresa en un sistema que relaciona la variación de las variables como la potencia eléctrica y la frecuencia [15], en una sola fórmula.

$$\Delta P_j = \Delta P_i + D \times \Delta \omega r \quad (1)$$

Donde:

$[\Delta P_j]$  es la variación de la potencia eléctrica – carga

$[\Delta P_i]$  es la variación de la potencia mecánica – generación

$[D]$  es la constante de amortiguamiento, puede variar depende el caso.

$[\Delta \omega r]$  es la variación de la velocidad angular.

En algunos casos los sistemas carecen de una regulación de velocidad [12], por lo cual su respuesta ante la variación de potencia se ve forzada por su constante de inercia  $H$  y la de amortiguamiento  $D$  [1].

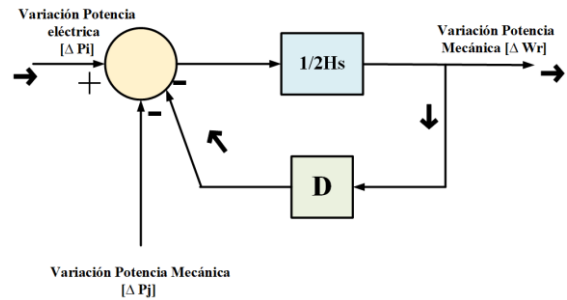


Figura 5. Lazo cerrado del sistema de respuesta de carga.

En los lineamientos de estabilidad de frecuencia se tiene de una respuesta inercial [22], de la misma máquina síncrona en una ventana de 3 a 5 segundos, ya que en los SEP existen alteraciones en la constante de equilibrio ya sea por variaciones de demanda o fallas [12], [22].

Para evitar dichos desbalances se incorpora las tres etapas de control en la regulación de frecuencia que se observa en la figura 6 y de igual manera más detallada sus regulaciones [12].

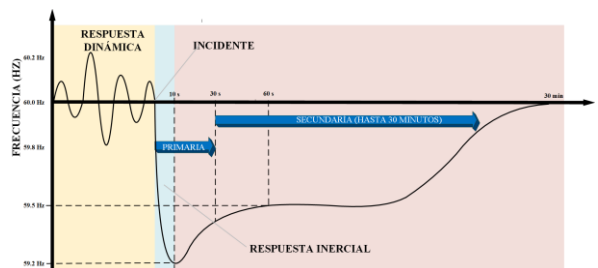


Figura 6. Tiempo – Control de frecuencia.

### 2.2.3 Regulación primaria de frecuencia.

La (RPF) regulación primaria de frecuencia se enfoca en una sola unidad de generación, tomando en cuenta que su actuar es el más rápido obteniendo resultados dentro de una ventana de tiempo entre los 3 a 30 segundos [10].



### 2.2.4 Regulación secundaria de frecuencia.

La RSF, se enfoca en el intercambio de potencia de un grupo de generadores después de una perturbación a áreas cercanas dentro del SEP, la regulación o estabilidad se caracteriza en operar dentro del margen de los 30 [s] a 2 [min] [10]. La acción de esta regulación permite que el sistema de la parte generadora logre obtener sus niveles nominales de despacho [12].

### 2.2.5 Regulación terciaria de frecuencia.

Esta acción de RTF opera después de los 10 [min] hasta los 30 [min] e enfoca en la restitución del funcionamiento de cualquier unidad generadora [12], llevándola a un redespacho. Es decir trabaja con una reserva de la RSF [22].

## 2.3 Generador Sincrónico.

Este es un elemento mecánico con características básicas pero muy fundamentales para obtener el control de la frecuencia en base a la potencia de la velocidad de giro. [22].

### 2.3.1 Ecuación de Oscilación.

Las características de inestabilidad dentro de un SEP están directamente relacionadas a las perturbaciones o fallas [23]. La cual, la ecuación de oscilación responde a la potencia de aceleración de los generadores síncronos [23].

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_j - P_i \quad (2)$$

La ecuación (2), se considera la base, pero en un punto de operación de tipo falla, esta cambia y se toma en cuenta el principio matemático del análisis en donde se

adquiere un nuevo estado con respecto a Delta [23].

$$Perturbación = \Delta P_a \quad (3)$$

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta \quad (4)$$

Por lo tanto, se reemplaza (4) en (2), obteniendo la siguiente expresión;

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = \Delta P_a = \Delta P_j - \Delta P_i \quad (5)$$

$$\left(\frac{2H}{\omega_s} \frac{d}{dt}\right) \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta P_j - \Delta P_i \quad (6)$$

Definiendo:  $g = \frac{d}{dt}$ ;

$$\left(\frac{2H}{\omega_s} g\right) g\Delta\delta = \Delta P_j - \Delta P_i \quad (7)$$

En por unidad:  $\omega_s = 1[p.u.]$

$$(2H g)g\Delta\delta = \Delta P_j - \Delta P_i \quad (8)$$

$$g\Delta\delta = \Delta\omega_r \quad (9)$$

$$(2H g)\Delta\omega_r = \Delta P_j - \Delta P_i \quad (10)$$

Mediante la transformada de Laplace:

$$\Delta\omega_r(s) = \frac{\Delta P_j - \Delta P_i}{2H s} \quad (11)$$

### 2.3.2 Generador Doblemente Alimentado [DFIG]

El planteamiento matemático de los aerogeneradores [17], permite operar a una velocidad variable pero controlada pues posee una tecnología en base a la electrónica de potencia de tipo convertidor estático de frecuencia [24]. Este convertidor

determinará los valores de la magnitud del voltaje y la frecuencia en la cual se puede observar en la figura 7 el esquema [22].

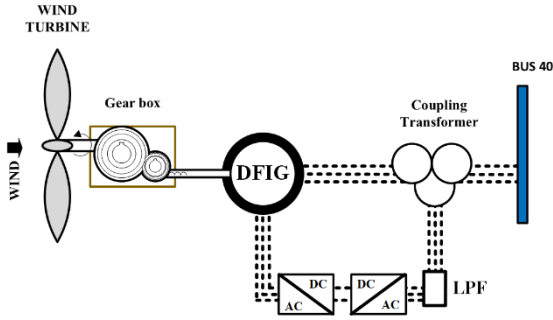


Figura 7. Aerogenerador con sistema doblemente alimentado [autor].

### 2.3.3 Modelación dinámica de DFIG

El caso de estudio, la máquina inducción IEEE tipo 2 en [24], Corresponde al modelo de generación eólica doblemente alimentada, [25] esta se caracteriza por el estudio del eje directo  $[di]$  y el eje de cuadratura  $[cu]$ , según [13] las cuales se las expresa en la ecuación (12).

$$\begin{aligned} V_{es}(di, cu) &= R_{es}I_{es}(di, cu) + \\ \frac{d}{dt}\psi_{es}(di, cu) &+ j\omega_{es}\psi_{es}(di, cu) \\ V_{ro}(di, cu) &= R_{ro}I_{ro}(di, cu) + \\ \frac{d}{dt}\psi_{ro}(di, cu) &+ \\ j\omega_{ro}\psi_{ro}(di, cu) & \end{aligned} \quad (12)$$

Una vez analizada la ecuación (12), se encuentra el vínculo entre el flujo del rotor  $\psi_{ro}$  y el flujo del estator  $\psi_{es}$ , expresadas en la ecuación (13), la cual permite controlar de una manera independiente el par del motor y su respectivo flujo [13].

$$\begin{aligned} \psi_{es}(di, cu) &= L_{es}I_{es}(di, cu) + \\ &L_{ma}I_{ro}(di, cu) \\ \psi_{ro}(di, cu) &= L_{ro}I_{ro}(di, cu) \\ &+ L_{ma}I_{es}(di, cu) \end{aligned} \quad (13)$$

Tomando como referencia (13), se detecta que:

$$\begin{aligned} I_{ro}(di, cu) &= \\ \frac{\psi_{ro}(di, cu) - L_{ma}I_{es}(di, cu)}{L_{ro}} \\ \psi_{es}(di, cu) &= L_{es}I_{es}(di, cu) + \\ L_{ma} \left( \frac{\psi_{ro}(di, cu) - L_{ma}I_{es}(di, cu)}{L_{ro}} \right) \end{aligned} \quad (13.1)$$

El voltaje del estator [13], de la ecuación (12), se puede reemplazar en los flujos del estator detallando en (14).

$$\begin{aligned} V_{es}(di, cu) &= R_{es}I_{es}(di, cu) + \\ j\omega_{es}\sigma L_{es}I_{es}(di, cu) &+ e(di, cu) \\ \sigma &= 1 - \frac{L_{ma}^2}{L_{es} - L_{ro}} \\ e_{di} &= -\omega_s \psi_{cu ro} \frac{L_{mo}}{L_{ro}} \\ e_{cu} &= \omega_s \psi_{di ro} \frac{L_{mo}}{L_{ro}} \end{aligned} \quad (14)$$

Aplicando cálculo diferencial en los términos del estator de la ecuación (12), (13), se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \frac{\delta e_{di}}{\delta t} &= \omega_s \frac{L_{mo}}{L_{ro}} (R_{ro}I_{cu ro} - \\ &V_{cu ro}) + S_{ro}\omega_{es} e_{cu} \\ \frac{\delta e_{di}}{\delta t} &= -\omega_s \frac{L_{mo}}{L_{ro}} (R_{ro}I_{cu es} + \\ &V_{cu ro}) - \frac{R_{ro}}{L_{ro}} + S_{ro}\omega_{es} e_{cu} \\ \frac{\delta e_{cu}}{\delta t} &= \omega_s \frac{L_{mo}}{L_{ro}} (V_{di ro} - \\ &R_{ro}I_{di ro}) - S_{ro}\omega_{es} e_{di} \\ \frac{\delta e_{cu}}{\delta t} &= \omega_s \frac{L_{mo}}{L_{ro}} (R_{ro}I_{di es} + \\ &V_{di ro}) - \frac{R_{ro}}{L_{ro}} + S_{ro}\omega_{es} e_{di} \end{aligned} \quad (15)$$

Las ecuaciones de voltaje reemplazadas de la ecuación (12), usando los flujos se determina que:

$$\begin{aligned} V_{ro}(di, cu) &= R_{ro}I_{ro}(di, cu) + \\ \frac{L_{ro}}{\omega_{es} L_{ro}} \frac{d}{dt} e(di, cu) &+ \\ jS_{ro}\omega_{es}\sigma L_{ro}I_{ro}(di, cu) &+ \\ E(di, cu) & \end{aligned} \quad (16)$$

$$E_{di} = -S_{ro}\omega_{es} \frac{L_{mo}}{L_{ro}} \psi_{cu es}$$

$$E_{di} = S_{ro}\omega_{es} \frac{L_{mo}}{L_{es}} \psi_{di es}$$

Los ejes directos y los ejes de cuadratura en valores de voltaje dan a conocer el funcionamiento del estator en valores dinámicos. [13]

## 2.4 Controlador PID de Frecuencia.

Los requisitos del sistema que este demande con el fin de tener una estabilidad recaen en la versatilidad del controlador, pues deberá sintonizar una respuesta rápida y eficiente ante situación de falla en la micro-red [26], [27].

Con respecto a los objetivos principales, esta sección corresponde al desarrollo de una técnica de sintonización, logrando que el mecanismo del controlador se abastezca todas las características, ya sea este como proporcional, el derivativo o el integral [27].

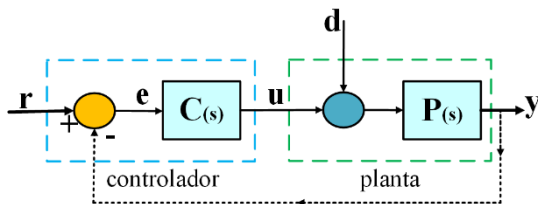


Figura 8. Diagrama de bloques – esquema convencional por retroalimentación. [autor]

El esquema de bloques de la figura 8, se ilustra a un compensador que se reemplaza con la variable  $C(s)$ , el cual es retroalimentado desde la salida de la planta, dicha estructura hace énfasis a un controlador PID [26], [27].

la caracterización de los controladores en base a sus siglas corresponde a determinados factores como la ganancia o la multiplicación.

- Para el controlador Proporcional (P), se lo resume en la simplificación de la operación del error por una ganancia proporcional de la salida, pero dicho resultado atiende a valores inestables por su alta ganancia [26].
- Para el controlador Integral (I), toma en cuenta el valor de su salida, precautelando que este sea nulo en un estado estacionario. También se puede rescatar que ante unos valores de ingresos nulos su operación permite obtener el error igual a cero [26].
- Para el controlador Derivativo (D), este simplemente determinará una respuesta rápida sin importar su ciclo de operación [11].

### 2.4.1 Estado Estacionario.

Las ventajas de este estudio son la implementación de conceptos básicos y así profundizar dichas temáticas, el estado estacionario se lo analiza bajo un sistema estable tomando en cuenta su entrada senoidal provocando así su respuesta a la frecuencia [26], [28].

### 2.4.2 Estado Transitorio.

El estado transitorio dentro del análisis de estabilidad de frecuencia toma un papel fundamental ya que su respuesta exhibe oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar su estado estable. [26]

### 2.4.3 Respuesta Transitoria y Respuesta Estable.

Los sistemas eléctricos de potencia su análisis es en tiempo real, [26] entonces necesita respuestas con respecto al tiempo en base al sistema de control la cual consta de dos partes:

La respuesta transitoria se refiere al estudio analítico desde su estado inicial hasta su estado final. [16] En cambio, para una respuesta estable recae en el análisis del comportamiento de su salida en base a su tendencia al infinito [26].

#### 2.4.4 Función de Transferencia.

El controlador PID, puede operar de las dos diferentes maneras antes mencionadas, ya sea en un estado estacionario como en un estado transitorio. [27] Desde el análisis matemático, se entiende que el controlador se basa de una función de transferencia con el fin de procesar el sistema [14].

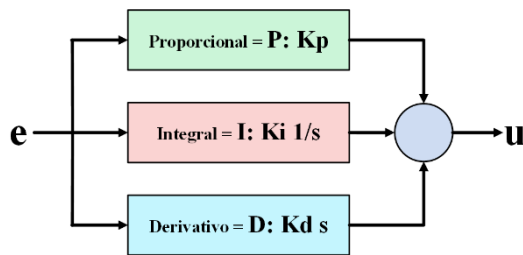


Figura 9. Diagrama de bloques – esquema del controlador PID.

En base al análisis matemático la figura 9. se la puede representar cómo:

$$\frac{u}{e} = k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s \quad (17)$$

Donde:

$T_r$ : corresponde al tiempo de reinicio del sistema.

$T_d$ : corresponde al tiempo derivativo del sistema.

$K_p$ : ganancia de tipo proporcional.

$K_i$ : ganancia de tipo integral.

$K_d$ : ganancia de tipo derivativa.

## 2.5 Optimización de HHO.

El algoritmo de optimización de Harris Hawks [18], [19] ya que se basa en la naturaleza, astucia, estrategias de búsqueda y ataque utilizadas por los halcones de Harris en la vida real. [30]

### 2.5.1 Antecedentes.

Este algoritmo o técnica está considerado en los últimos años como un método novedoso, evolucionando en la efectividad de sus resultados ante diferentes problemas de ingeniería y ciencia de carácter complejos [30]. Internamente el algoritmo utiliza modelos matemáticos para el cálculo del nivel de energía y la posición ya sea del halcón o del conejo [20].

Para el caso de estudio, las unidades generadoras de la micro-red vienen siendo los halcones y la población o demanda los conejos. El principio de operación y comprensión del algoritmo metaheurístico parte de la idea de tener una metodología pseudoaleatoria. Es decir, la caza del halcón de Harris utiliza el espacio de búsqueda – ataque en sus fases, ya sea la fase de exploración o la de explotación [18].

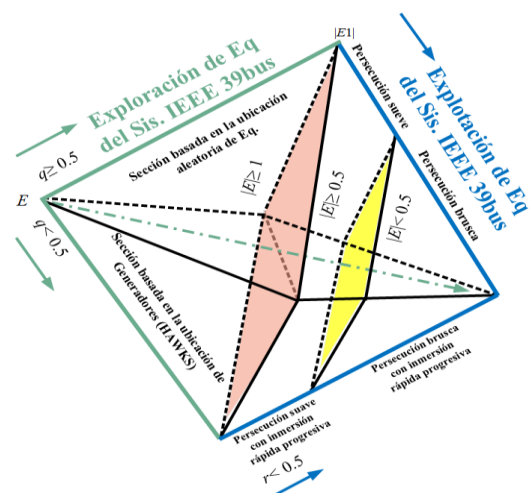


Figura 10. Principio de Optimización de Harris Hawks. [autor].

### 2.5.2 Fase de Exploración en HHO.

La naturaleza de la caza del halcón en esta fase se enfoca en el reconocimiento del espacio, el monitoreo es clave para encontrar e identificar posibles presas, la ubicación de este reconocimiento toma lugar valores aleatorios utilizados en la ecuación (18) [20].

$$X(nL + 1) = \begin{cases} X_{rja}(nl) - rja_1 |2rja_2 X(nL)| \\ (X_{rab}) - Z_{mo}(nL) - rja_3(\zeta) \end{cases} \quad (18)$$

$$\therefore \zeta = (ib + rja_4(jb - ib))$$

$$\therefore \rightarrow \begin{cases} P \geq 0,5 \\ P < 0,5 \end{cases}$$

La interacción de la fase exploratoria revela la ubicación actual y la ubicación siguiente del halcón como se muestra en la figura 10 [18].

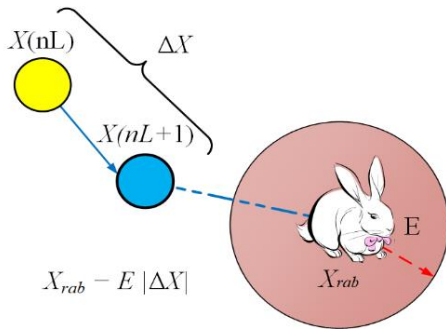


Figura 11. Fase de Exploración en HHO.

De un conjunto de halcones, la modalidad de cacería es la de escoger a un halcón el cual se denominarán  $X_{rja}(nl)$  [21], el cual deberá reportar distancias medias y valores de ubicación expresadas en la ecuación (19).

$$X_{mo}(nL) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X_i(nL)$$

$$\therefore M = (n \text{ halcones}) \quad (19)$$

$$X_{rab}(nL) = (\text{ubi. conejos})$$

### 2.5.3 Fase de Explotación en HHO

Una vez concluida la fase de reconocimiento del área [21], el conejo / presa, intenta en varias ocasiones un enfrentamiento el cual no amerite un gran esfuerzo, mientras tanto los halcones preparan cuatro maneras diferentes de atraparla como se observó en la figura 11.

- Persecución brusca.
- Persecución brusca con inmersión rápida progresiva.
- Persecución suave.
- Persecución suave con inmersión rápida progresiva [31].

En el principio natural de caza de los halcones, La probabilidad de escapar del conejo  $Rab_p \begin{cases} < 0,5 \\ \geq 0,5 \end{cases}$ , ya que la presa deberá precautelar su energía  $|E|$ , pese a las persecuciones [21].

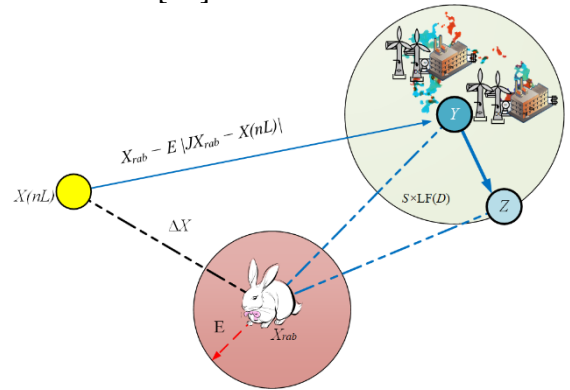


Figura 12. Fase de Explotación 1 en HHO – estrategias de persecución.

### 2.5.4 Persecución brusca del halcón de Harris.

Esta modalidad de caza la se puede apreciar en la figura 12, y está sujeta a varias restricciones como la ecuación (20), y los niveles de energía del conejo deben ser bajos, a pesar de ello, el halcón debe estar en constante monitoreo de su ubicación

actual y de su ubicación futura y esto se lo puede representar en la ecuación (21) [18].

$$Rab_p \geq 0,5 ; |E| < 0,5 \quad (20)$$

$$X(nL + 1) = X_{rab}(nL) - E|\Delta X(nL)| \quad (21)$$

### 2.5.5 Persecución Suave del halcón de Harris.

No obstante, la caza de persecución suave también tiene sus restricciones descritas en (22) y visualizadas en la figura 12, el estado de la presa es deplorable a causa de los constantes ataques por parte del conjunto de halcones [30].

Aquí se puede expresar de manera matemática, ecuación (23), la ubicación tanto de la presa como del halcón cazador. La descripción del adjetivo que se usa para el estado de energía se puede determinar mediante la ecuación (24) [30].

$$Rab_p \leq 0,5 ; |E| \geq 0,5 \quad (22)$$

$$X(nL + 1) = \Delta X(nL) - E|JX_{rab}(nL) - X(nL)| \quad (23)$$

$$J = 2(1 - rja) \quad (24)$$

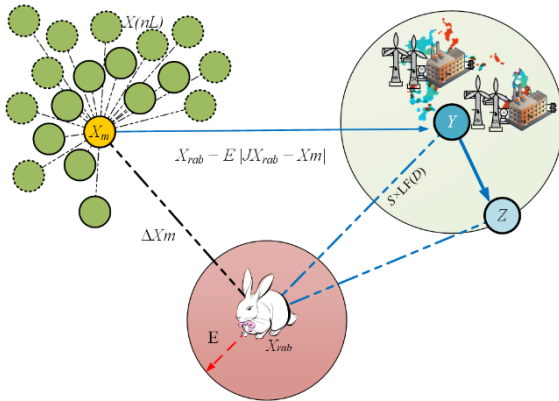


Figura 13. Fase de Explotación 2 en HHO – estrategias de persecución.

### 2.5.6 Persecución suave con inmersión rápida progresiva.

Las inmersiones en esta etapa provocan que la presa tenga aun un nivel de energía considerablemente alto para escapar pese a su baja probabilidad ( $Rab_p$ ) ya que es menor a 0,5% (ecuación (25)) [19]. No obstante, y al igual que en los casos anteriores el halcón actualiza su ubicación futura mediante la ecuación (26) y se puede apreciar en la figura 13. [31]

$$Rab_p < 0,5 ; |E| \geq 0,5 \quad (25)$$

$$\begin{aligned} X(nL + 1) = \\ \begin{cases} Y = X_{rab}(nL) - E|\zeta| \\ W = Y + S * LF(D) \end{cases} \\ \therefore \zeta = JX_{rab}(nL) - X(nL) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\therefore \rightarrow \begin{cases} F(Y) < F(X(nL)) \\ F(W) > F(X(nL)) \end{cases}$$

### 2.5.7 Persecución brusca con inmersión rápida progresiva.

En esta última etapa, la probabilidad y la energía el conejo en su intento por escapar está bajo los niveles mencionados [21] y se logra expresar en la ecuación (27), es decir el halcón logra obtener su presa [21]. Así mismo, la fase de explotación persiste en actualizar la ubicación futura del halcón mediante la ecuación (28).

$$Rab_p < 0,5 ; |E| < 0,5 \quad (27)$$

$$\begin{aligned} X(nL + 1) = \\ \begin{cases} Y = X_{rab}(nL) - E|\zeta| \\ W = Y + S * LF(D) \end{cases} \\ \therefore \zeta = JX_{rab}(nL) - X_{mo}(nL) \\ \therefore \rightarrow \begin{cases} F(Y) < F(X(nL)) \\ F(W) < F(X(nL)) \end{cases} \end{aligned} \quad (28)$$

### 3 Formulación del problema

Mediante la simulación de un modelo agregado lograr obtener gráficos y diagramas del óptimo control como la solución a eventos de desbalance de carga y generación.

El incremento de equipotencialidades controladas bajo análisis de contingencias en un SEP, pocas de las veces generan problemas en los valores nominales de la frecuencia del sistema, por lo tanto y como caso de estudio se plantea optimizar el control de una unidad generadora.

La metodología de optimización deberá arrojar valores mínimos de pérdida de generación, pese a la potencia dinámica actual de la demanda.

Las herramientas de simulación como (Simulink - Matlab), serán clave para la

modelación, modificación, incremento (modelo dinámico agregado DFIG) [22] y optimización de este para lograr valores óptimos de frecuencia que los estándares solicitan para que el sistema de potencia trabaje de manera adecuada.

#### 3.1 Sistema base – Modelo IEEE 39 barras

El sistema IEEE de 39 barras dispone de 10 unidades generadoras, 19 cargas - equipotencialidades, 12 transformadores y 34 líneas de transmisión, con respecto a los voltajes y frecuencia el sistema trabaja a 345 kV (base) derivando otros voltajes bases como 230 kV, 138 kV y 16,5 kV, todo esto bajo una frecuencia nominal de 60 Hz.

Estos datos desglosados se pueden apreciar en la figura 14.

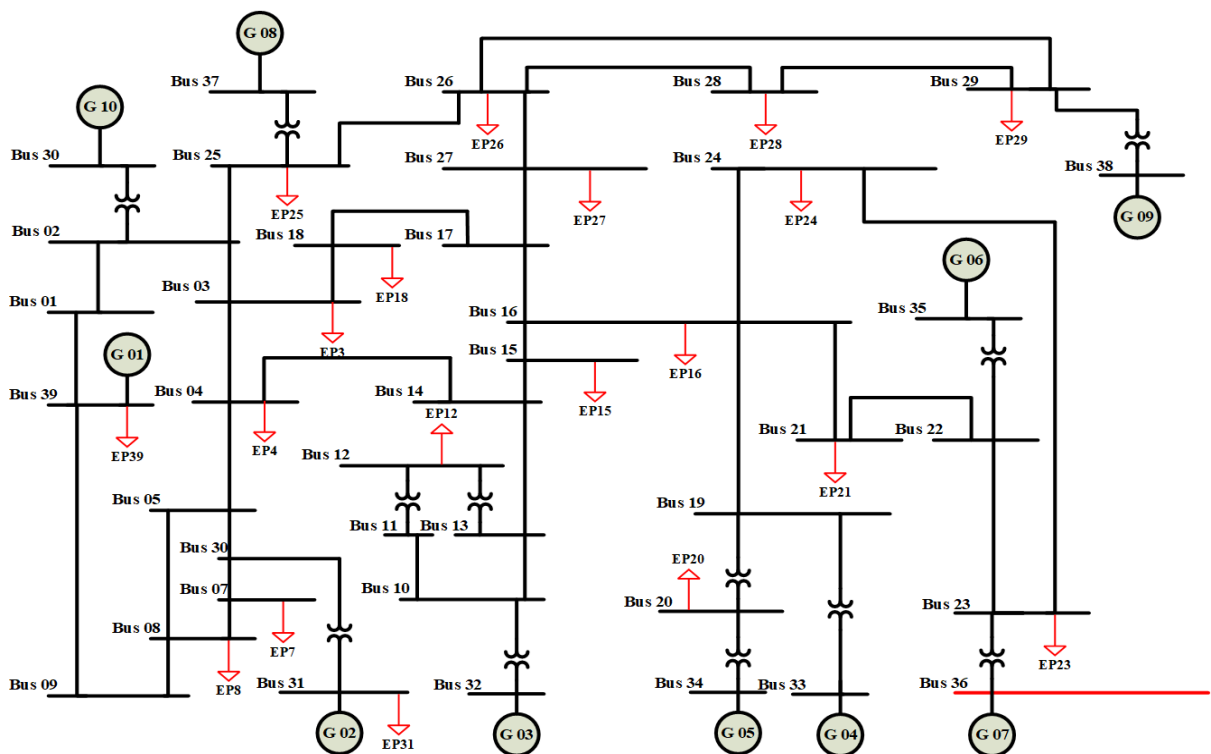


Figura 14. Modelo de prueba IEEE de 39 barras. [autor]



los datos de operación son clave para obtener flujos de potencia del sistema que se va a operar, [8] en la tabla (2) se observan los datos de voltaje [p.u.] Y su respectiva frecuencia con respecto a cada barra y adicional su modelo agregado.

Tabla 2. Datos de Magnitud de voltaje en IEEE 39 barras.

Barra	Magnitud de voltaje	Barra	Magnitud de voltaje
Bus 01	1,047356	Bus 21	1,03176
Bus 02	1,048736	Bus 22	1,049795
Bus 03	1,030173	Bus 23	1,044789
Bus 04	1,003863	Bus 24	1,037311
Bus 05	1,005311	Bus 25	1,057568
Bus 06	1,007672	Bus 26	1,052075
Bus 07	0,9970012	Bus 27	1,037741
Bus 08	0,9960199	Bus 28	1,050122
Bus 09	1,028226	Bus 29	1,049942
Bus 10	1,017151	Bus 30	1,0475
Bus 11	1,012694	Bus 31	0,982
Bus 12	1,000151	Bus 32	0,9831
Bus 13	1,014307	Bus 33	0,9972
Bus 14	1,011733	Bus 34	1,0123
Bus 15	1,015384	Bus 35	1,0493
Bus 16	1,031774	Bus 36	1,0635
Bus 17	1,033555	Bus 37	1,0278
Bus 18	1,030931	Bus 38	1,0265
Bus 19	1,049861	Bus 39	1,03
Bus 20	0,9911765	DFIG	1,00529

### 3.1.1 Modelación de la Micro-red

El escenario de trabajo de este artículo científico se modela en el flujo de carga y el flujo de generación, teniendo en cuenta la estabilidad de la frecuencia y las pérdidas de generación del modelo agregado DFIG.

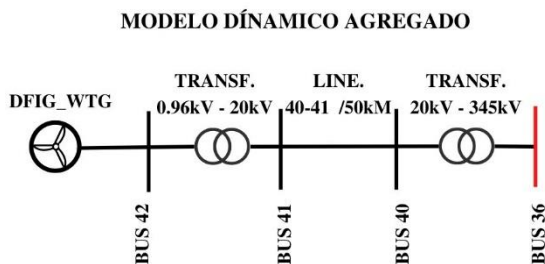


Figura 15. Modelo dinámico agregado al sistema de IEEE 39 barras.

En la figura 15, se logra apreciar el circuito que conecta a la barra 36 del sistema general.

Este modelo dinámico, está conformado por la micro-red de varios generadores eólicos DFIG conectados en paralelo cada uno de ellos con su respectivo transformador elevador, los cuales se conectarán a la barra 41. Las micro redes eólicas por su componente generador que es el viento, y para aprovechar al cien por ciento este recurso natural, están alejadas varios kilómetros del anillo que conforma el SEP, por lo cual se acopló una línea de transmisión de 50 km.

La línea de transmisión ópera y transporta con una capacidad de 20 kV, para lo cual conectarse al sistema IEEE 39 barras, se realiza la acción mediante transformadores elevadores.

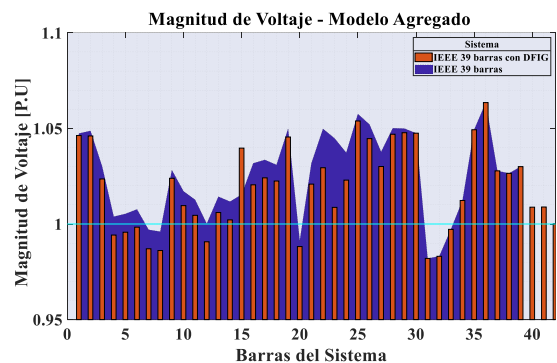


Figura 16. Modelo dinámico agregado al sistema IEEE de 39 barras. [autor]

### 3.2 Método de Solución y Modelación matemática de HHO.

Previo al análisis de los sistemas optimizados con el modelo agregado DFIG, se pretende realizar un flujo de potencia mediante el método de Newton Raphson desacoplado rápido al sistema base, para luego proceder con el algoritmo de optimización y lograr extraer los datos de acuerdo con la función objetivo.



<b>Algoritmo de Optimización del Sistema de Transmisión</b>	
<b>Inicio</b>	
Paso 1:	Entradas / Salidas Entradas → ingreso de datos al sistema  Salidas → Psist, Qsist y Freq sist. ΔF
Paso 2:	Cálculo máquina de inducción IEEE tipo 2 - Potencia nominal - Tensión nominal - Frecuencia del Sistema - Inercia del Sistema - Resistencia rotor - estator - Reactancias - Valores de cargas del sist.
Paso 3:	Flujo de potencia – sistema base
Paso 4:	Optimización del sistema - Se aplica algoritmo de optimización de Harris Hawks.  - Se toma valores óptimos
Paso 5:	Flujo de potencia con valores óptimos  - Sistema modificado. - Sistema con modelo agregado (DFIG).
Paso 6:	Resultados de Casos. Obtener respuesta óptima de Δ frecuencia.
<b>Fin</b>	

Una vez que ya se tiene los valores de entrada se procede a realizar la optimización del sistema considerando las restricciones de Harris Hawks, y así encontrar una convergencia fiable ante los casos posibles de respuesta cuando se añade una micro-red eólica al sistema.

<b>Algoritmo de Optimización de Harris Hawks</b>	
<b>Inicio</b>	
Paso 1:	Entradas / Salidas Entradas → nP, iT, P/Qeq, P/Qgen. Salidas → Δf, P/Q lossed, Uubi, Xubi
Paso 2:	Simulación Simulink – Matlab For $X(nL + 1)$ ΔP, ΔQ End for For $i=1:nL$ ΔV, I End for
Paso 3:	Almacenamiento de resultados (primer escenario)
Paso 4:	Optimización del sistema con HHO Mientras→ no se cumple restricciones

Entonces→  
    Establecer Xrab / halcones  
Para Xrab=1:nL  
     $X(nL + 1)$  → ubicación HHO  
    Sí  $|E| \geq 1$  fase de exploración  
        Encontrar ubicación ecuación (18)  
    exploración → explotación  
    Sí  $|E| < 1$  fase de explotación  
    Si, entonces →  
        restricción 20  
    Encontrar ubicación ecuación (21)  
    Si, entonces →  
        restricción 22  
    Encontrar ubicación ecuación (23)  
    Si, entonces →  
        restricción 25  
    Encontrar ubicación ecuación (26)  
    Si, entonces →  
        restricción 27  
    Encontrar ubicación ecuación (28)  
    Si, no – entonces →  
Retomar a  $X(nL + 1)$   
    Fin si  
    Fin si  
    Fin para  
    Fin  
Paso 5: Minimización FO – extraer datos óptimos.

**Fin**

### 3.2.1 Flujo de potencia – frecuencia.

El flujo de potencia en base al modelo de NRDR, e incluyendo los valores optimizados de HHO, hacen que la función objetivo de este sistema cumpla con la disminución del rango de respuesta ante eventos de frecuencia en la inyección de carga y generación.

## 4 Análisis de resultados

A continuación, se examina el caso de estudio de la investigación previa y un análisis de variación de frecuencia en las fases del sistema con el modelo agregado.

### 4.1 Caso de Estudio

Los resultados en la aplicación de HHO, cumple el caso de estudio propuesto al incrementar el factor de escala de todas las cargas del sistema IEEE 39 barras de  $1[p.u]$  a  $1,05[p.u]$ , de igual manera se simuló un corto circuito trifásico franco en

la *line* – 17 y desconexiones de cargas controladas, con estos eventos se analiza que pasa con la frecuencia en la parte de generación del sistema y en la micro-red.

#### 4.1.1 Generadores síncronos del sistema IEEE 39 barras.

En la herramienta de simulación - Simulink de Matlab, se realizó la implementación del sistema de 39 barras de IEEE, en la cual al correr un flujo de potencia en condiciones iniciales se aprecia los datos en la tabla (3) de las máquinas de inducción.

Tabla 3: Excitación de generadores del sistema.

Datos de Excitación de Maquinas Síncronas.	
Ganancia del Regulador - Ka	200
Constante de tiempo - Ta	0,001
Excitador ke – Te(s)	1, 0
Ganancia del Regulador - Kp	1
Reducción de Ka Transitoria.	0
Lmin/max de out de regulador [p.u]	0 - 12,3

Se observa en la figura 17, el instante de operación de las máquinas de inducción teniendo así en un instante de tiempo dinámico la estabilidad de este en todas sus unidades generadoras.

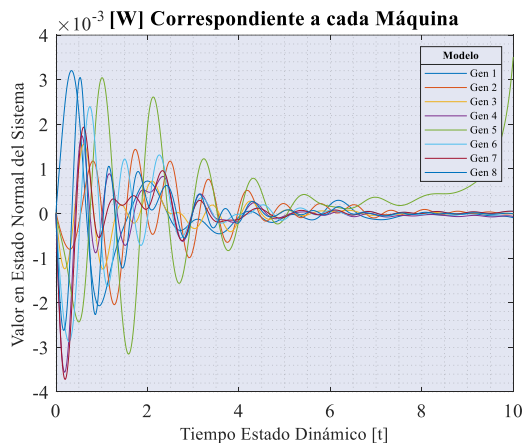


Figura 17. [W] de los generadores en IEEE de 39 barras.

Tabla 4: Datos de operación de generadores del sistema

Datos de operación de Maquinas Síncronas.	
Velocidad nominal [rpm]	3600
Polos P	4
Constante de Inercia	6.175
Factor de fricción	0
Lmin – Lmax de apertura [p.u]	0 – 4,496

En la tabla (4), se encuentra los datos de operación que las máquinas síncronas tenían por defecto antes y durante los modelos de prueba y fallas en el sistema base, de igual manera se puede apreciar en la figura 18, el comportamiento de los valores de salida de W.

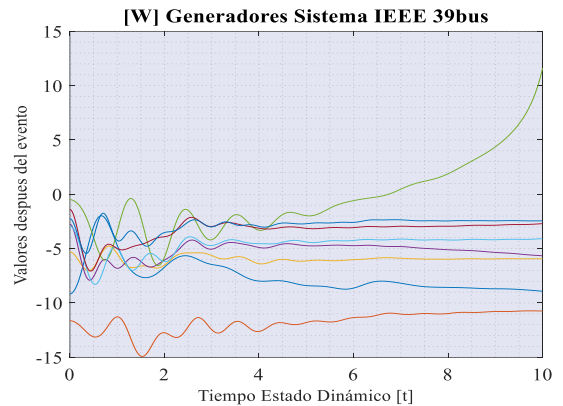


Figura 18. Respuesta de [W] ante falla en el sistema.

Como las máquinas síncronas del sistema están operando como generadores, se representa a su fuerza electromotriz en estado adelantado respecto al voltaje, la figura 18, muestra el estado de operación y su respuesta del ángulo en valores [p.u].

La figura 19, sus datos fueron extraídos de la barra al que la máquina síncrona está conectada. Es importante dejar en claro que la variación del ángulo repercute en las oscilaciones del mismo rotor hasta llegar a la velocidad de sincronismo y por ende a la estabilidad del sistema previo a cualquier situación de evento.

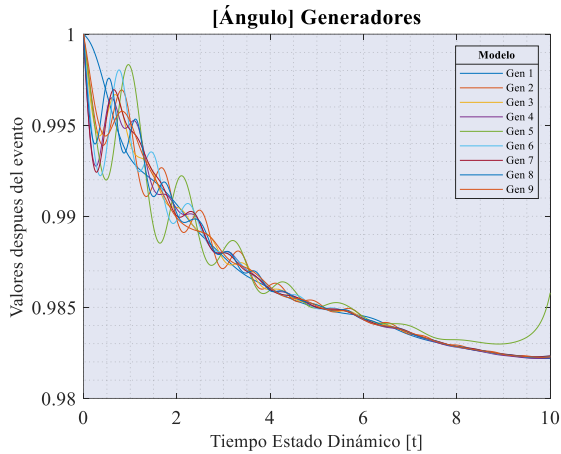


Figura 19. Ángulo de los generadores del sistema.

#### 4.1.2 Generadores DFIG – Modelo Agregado.

Las funciones de transferencia de la ecuación (17), fueron claves para conocer el comportamiento del sistema resultante, Los valores de ganancia, el tiempo establecido y el tiempo de retardo en comparación con el modelo se registra en la tabla (4).

A la hora de simular estos sistemas es necesario tomar en cuenta los parámetros tanto como proporcional, integral o derivativo sean los correctos.

#### 4.1.3 Curva de convergencia de Harris Hawks.

El algoritmo de HHO, toma valores del sistema base el cual es considerado con una gran dimensión de generación y carga, es por esto que se recurre a las búsquedas exhaustivas y lograr en corto tiempo los casos de élite de F.O. en la curva de convergencia.

Como se observa en la figura 20, se tiene las curvas de convergencia de acuerdo con la población (Cargas) del sistema, logrando obtener tres modelos de operación, cada uno de ellos con valores fiables en la ubicación de despacho de generación – carga para así tener un control óptimo de la frecuencia resultante en el sistema.

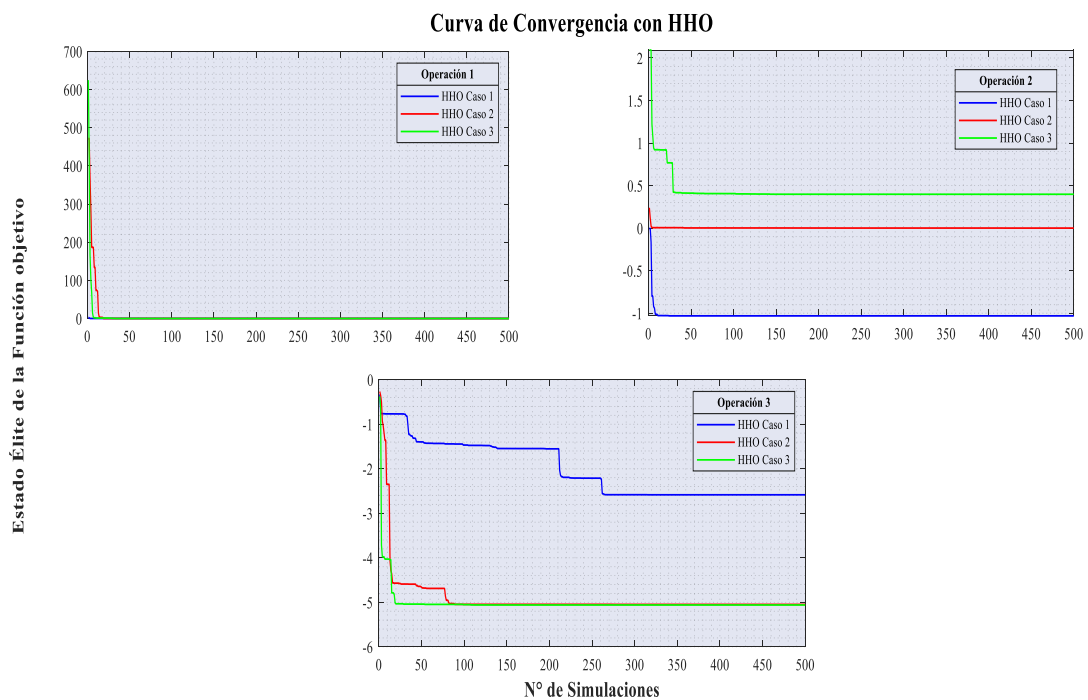


Figura 20. Curva de convergencia– optimización de Harris Hawks.

## 4.2 Respuesta Óptima de frecuencia

Los límites óptimos admisibles de variación de frecuencia dependen de la capacidad en el balance a suministrar.

### 4.2.1 Respuesta de balance entre generación (DFIG) y carga - Caso 1

En los eventos de simulación con el modelo agregado, se propone que a los 10 [s] se desconecte 3 cargas del sistema, provocando una pérdida súbita de carga.

Citando la figura 3, podemos observar que la potencia mecánica es mayor a la potencia eléctrica provocando una aceleración de la inercia de la máquina generadora y un alto rango de la frecuencia.

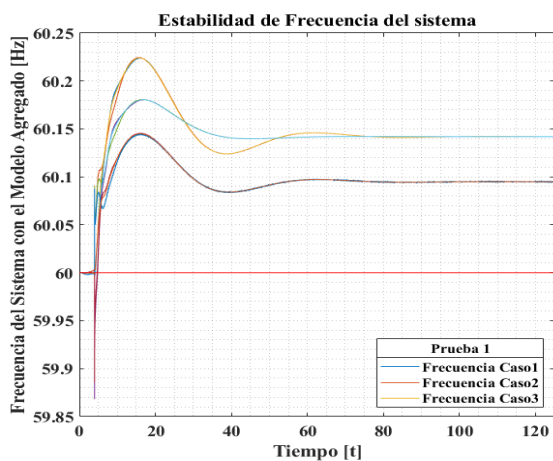


Figura 21. Balance entre generación y carga – caso 1.

Minutos después del evento, actúa el óptimo control en estado dinámico con ayuda la regulación primaria de frecuencia.

Tabla 5: Datos de variación de Frecuencia – caso 1

Caso 1			
	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Freq Max</b>	60,2238	60,2245	60,2240
<b>Freq Q3</b>	60,1421	60,1421	60,1421
<b>Freq Q2</b>	60,0861	60,0958	60,0871
<b>Freq Q1</b>	60,0002	60,0002	60,0002
<b>Freq Min</b>	59,8689	59,9640	59,9643

Así mismo para detallar de una mejor manera la respuesta del control primario se aprecia los valores de frecuencia en la tabla (5) y de igual manera en figura 21 y 22, llegando a una conclusión que nuestro sistema está trabajando dentro de los rangos normados.

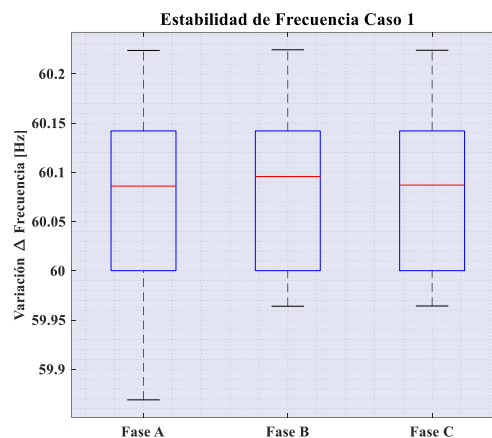


Figura 22. Datos de Frecuencia – caso 1.

### 4.2.2 Respuesta de balance entre generación (DFIG) y carga - Caso 2

El escenario de simulación es de 250 [s], es decir pasando los cuatro minutos de simulación, estando en el rango permisible de la respuesta dinámica automática de los generadores para su estabilidad.

Una vez que pasó el evento de la pérdida súbita de carga, ahora el caso dos, se tiene el disparo de la micro-red que conforman el parque de generación eólica DFIG.

En la figura 4 y 23, se logra apreciar una desaceleración de [W], y por ende valores inferiores de la frecuencia nominal. Es decir, en el caso dos se analiza que la potencia eléctrica es mayor a la potencia mecánica.

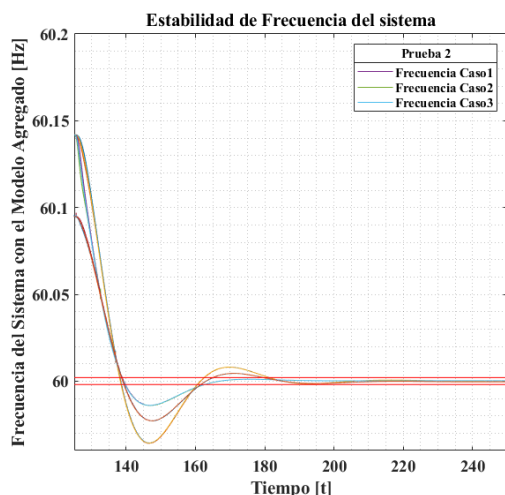


Figura 23. Balance entre generación y carga – caso 2.

El caso dos de estudio, en base a los eventos se toma la barra 23, y se analiza sus valores de frecuencia en las 3 fases, por motivos del cortocircuito trifásico.

Tabla 6: Datos de variación de Frecuencia – caso 2

Caso 2			
	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Freq Max</b>	60,1804	60,1807	60,1804
<b>Freq Q3</b>	60,1420	60,1420	60,1420
<b>Freq Q2</b>	60,0561	60,0701	60,1804
<b>Freq Q1</b>	60,0002	60,0002	60,0002
<b>Freq Min</b>	59,8682	59,9857	60,1804

Tanto en la tabla (6) como en la figura 24, se analiza la frecuencia mínima obteniendo valores ya sean de  $F_{min} = 59,86 \text{ Hz}$  o  $59,57 \text{ Hz}$ , que si bien es cierto no es tan brusco el disparo de generación.

Gracias al óptimo control de respuesta a la frecuencia hacen que la constante de inercia y la constante de amortiguación con sus valores internos en las máquinas de inducción DFIG, provoquen su estabilidad en los tiempos estimados por la RPF.

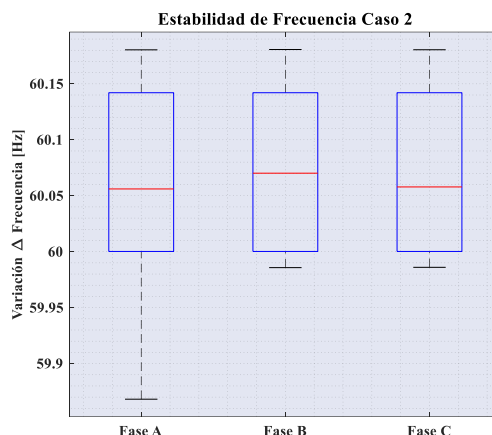


Figura 24. Datos de Frecuencia – caso 2.

### 4.2.3 Respuesta de balance entre generación (DFIG) y carga - Caso 3

La modelación matemática recae en dos pseudocódigos, el primero es donde el flujo de potencia me arroja los valores de entrada para optimizarlos, con esto se controla de manera optimizada el disparo de la generación de la micro-red ubicada dentro del modelo agregado.

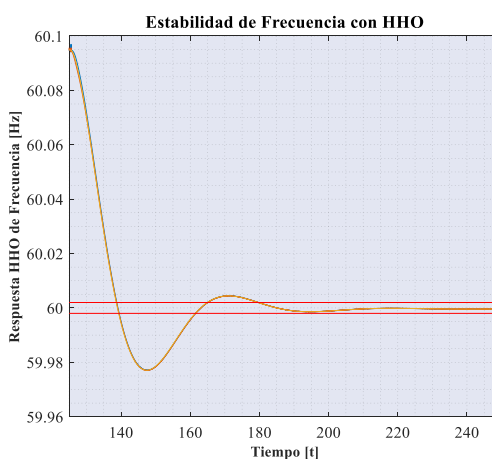


Figura 25. Balance entre generación y carga – caso 3.

El algoritmo de Harris, en su persecución de conejos en nuestro caso (load del sistema que tienen un exceso de carga momentánea), provocan el decrecimiento de la frecuencia como se observa en la figura 25.

la respuesta óptima para que ataque la micro red es en la carga:

- Load 01
- Load 02
- Load 09
- Load 06

Tabla 7: Datos de variación de Frecuencia – caso 3

Caso 3			
	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Freq Max</b>	60,1457	60,1454	60,1450
<b>Freq Q3</b>	60,0949	60,0948	60,0949
<b>Freq Q2</b>	60,0045	60,0081	60,0044
<b>Freq Q1</b>	59,9996	59,9996	59,9996
<b>Freq Min</b>	59,8855	59,9770	59,9771

Para el caso óptimo nótese la tabla (7) y la figura 26, en los cuales se encontrará valores de frecuencia Q2, ya que aquí la variación de frecuencia se tiene los valores mínimos dando respuesta a la función objetivo.

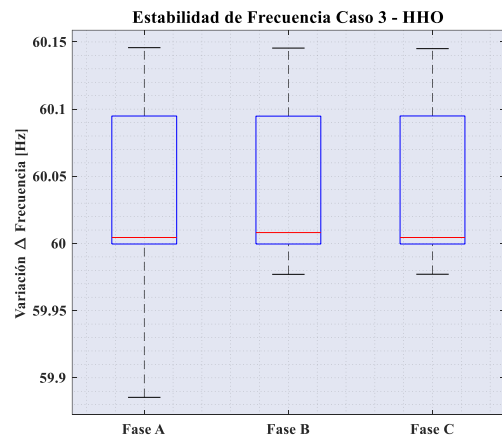


Figura 26. Datos de Frecuencia – caso 3.

#### 4.2.4 Respuesta a $\Delta$ de Frecuencia Óptima.

La respuesta de la figura 27 a la variación de frecuencia en estado estable luego de ser sometida al óptimo control.

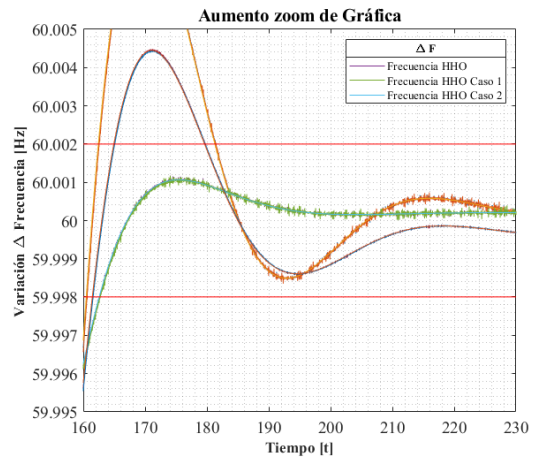


Figura 27.  $\Delta$  de Frecuencia en estado estable.

En la tabla (8), se aprecia en la fila 1, la frecuencia nominal (Freq. ideal) del sistema, en la fila 2, encontrará el promedio de las frecuencias Q2 para los 3 casos de estudio (Freq. real), y en la fila 3, se tiene el valor de la variación de frecuencia en estado estable de nuestro sistema.

Tabla 8: Minimización de  $\Delta$  en frecuencia.

Minimización - $\Delta$ de Frecuencia			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3
<b>Freq. ideal</b>	60,0000	60,0000	60,0000
<b>Freq. real</b>	60,0896	60,1022	60,0056
<b><math>\Delta</math> Freq.</b>	0.0896	0.1022	0.0056

## 5 Conclusiones

Luego de realizar las debidas simulaciones tomando en cuenta las restricciones de optimización y analizar sus resultados que otorga la investigación se concluye que:

El sistema el cual se empieza a simular y correr los flujos de potencia dio el resultado que 1[%] recae en las pérdidas, es decir los generadores aportan 6140,811 [MW] correspondiente al 50[%] de potencia activa, y se consume 6097,100 [MW] correspondiente al 49[%], sin embargo, al incrementar la micro-red propuesta, este índice de

despacho de potencia activa cambio, teniendo una inyección de potencia activa 5951,6133[MW] que corresponden al 46,48%, la carga en este instante de tiempo fue de 6401,95[MW], provocando una inestabilidad en el sistema y por ende a la frecuencia, como propuesta de mejora ante estos eventos se logra compensar la pérdida incrementando 4259[MW] de potencia activa extraída de los aerogeneradores doblemente alimentado DFIG, siendo éste el 3.32[%] de aporte al sistema, sin duda alguna se generó una pérdida de 25,34[MW] correspondiente al 0,19[%].

El análisis exhaustivo del balance entre generación y demanda es fundamental para obtener los índices en la variación de la frecuencia en estado estable ante situaciones de desbalances o fallas en los SEP.

Mediante la optimización con el algoritmo de Harris Hawks, se logró estimar las variables del control en la inercia de los generadores verificando su aceleración o desaceleración la cual se refleja en la  $\Delta$  de frecuencia resultante de 0.0056 [Hz].

La regulación primaria de frecuencia que también intervino en el análisis fue fundamental ya que este, ayudó a que el sistema se mantenga en valores nominales y cumpla con el compromiso del correcto intercambio de energía con áreas aledañas dentro del SEP.

## 5.1 Trabajos futuros

Los resultados favorables obtenidos en la presente investigación recomiendan continuar con el análisis de la calidad de energía considerando el estudio de la emisión de armónicos y flicker asociadas a la generación eólica.

Se sugiere seguir aportando otros modelos de optimización y compararlos con la respuesta de HHO en la minimización de la variación de frecuencia.

De igual manera se aconseja replicar la investigación tomando en cuenta la escala de tiempo a un largo plazo y su respuesta ante la regulación secundaria y terciaria de frecuencia.

## 6 Referencias

- [1] A. Arenas, P. Mediavilla, F. Gracia, and P. Garcés, “Estabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia con Generación Renovable,” *Organ. Latinoam. Energía*, pp. 1–28, 2013.
- [2] E. L. Contexto and A. D. E. L. O. S. Sistemas, “Microrredes – una revisión metodológica en el contexto actual de los sistemas eléctricos,” vol. 593, no. Cc, 2019.
- [3] CONELEC, “Estadística del sector eléctrico ecuatoriano - Folleto resumen,” p. 54, 2019.
- [4] J. I. Pérez Arriaga, L. J. Sánchez de Tembleque, and M. Pardo, *La gestión de la demanda de electricidad vol. I*, vol. I, no. I. 2005.
- [5] O. Nuñez, D. Ortiz Villalba, and R. Palma--Behnke, “Microrredes en la red eléctrica del futuro - caso Huatacondo,” *Cienc. y Tecnol. Rev. la Univ. Costa Rica*, vol. 29, no. 2, pp. 1–16, 2013.
- [6] G. F. Calderon Intriago, J. C. Mera Macías, and J. C. Guamán Segarra, “El Mercado Eléctrico Ecuatoriano Y Su Incidencia En Los Altos Costos De Las Tarifas De Energía Eléctrica a Los Consumidores Residenciales Y Comerciales En La Provincia De Manabí Comprendidos En El Periodo De Enero a Diciembre Del 2018.,” *Rev. Investig. en Energía, Medio Ambient. y Tecnol. RIEMAT ISSN 2588-0721*, vol. 3, no. 2, p. 24, 2018.
- [7] ARCONEL 006/2020, “Resolución No. ARCONEL-006/2020,” pp. 1–58, 2020.

- [8] J. D. Garzón-Hidalgo and A. J. Saavedra-Montes, "Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas de Colombia," *TecnoLógicas*, vol. 20, no. 39, pp. 39–53, 2017.
- [9] Departamento de Energía EE.UU., "Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad," 2007.
- [10] Y. Guan, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, D. Wu, W. Feng, and Y. Wang, "Estabilidad de frecuencia de microrredes híbridas fotovoltaicas-batería-hidroeléctricas controladas jerárquicamente," pp. 1573–1580, 2014.
- [11] J. Gómez Gómez, "Estabilidad De Frecuencia De Un Sistema Interconectado Con Alta Penetración De Renovable," 2018.
- [12] Y. Khayat *et al.*, "Control de Microrredes AC Abstracto Introducción," pp. 5–10, 2022.
- [13] R. Azagra, "MODELING AND CONTROL OF A DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR," no. July, pp. 17–19, 2013.
- [14] V. Cárdenas, D. Echeverría, and J. Cepeda, "Análisis de Confiabilidad de la Generación Considerando el Ingreso de Energías Renovables No Convencionales en los Sistemas de Potencia," *Rev. Técnica "Energía,"* vol. 11, no. 1, pp. 101–107, 2015.
- [15] S. Member and F. Jimenez, "Estudio del Control de Frecuencia en Sistemas de Potencia incluyendo Energías Renovables'," 2017.
- [16] C. Eduardo and U. Londoño, "Control Distribuido de Frecuencia en una Microrred Carlos Eduardo Uribe Londoño," 2020.
- [17] W. Vásquez and J. Játiva, "Modelación, Simulación y Control de Aerogeneradores con Generador de Inducción Doblemente Alimentado Utilizando Matlab," *Rev. Técnica "Energía,"* vol. 11, no. 1, pp. 143–152, 2015.
- [18] B. P. Sahoo and S. Panda, "Load frequency control of solar photovoltaic/wind/biogas/biodiesel generator based isolated microgrid using harris hawks optimization," *2020 1st Int. Conf. Power, Control Comput. Technol. ICPC2T 2020*, pp. 188–193, 2020.
- [19] R. Roy, V. Mukherjee, and R. P. Singh, "Harris hawks optimization algorithm for model order reduction of interconnected wind turbines," *ISA Trans.*, no. xxxx, 2021.
- [20] S. I. Abba *et al.*, "Emerging Harris Hawks Optimization based load demand forecasting and optimal sizing of stand-alone hybrid renewable energy systems— A case study of Kano and Abuja, Nigeria," *Results Eng.*, vol. 12, no. July, p. 100260, 2021.
- [21] J. Liu, X. Liu, Y. Wu, Z. Yang, and J. Xu, "Dynamic multi-swarm differential learning harris hawks optimizer and its application to optimal dispatch problem of cascade hydropower stations," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 242, p. 108281, 2022.
- [22] N. Vieyra, P. Rolando, M. Ortiz, L. M. Castro, and S. El, "Modelado Dinámico de Microrredes con Generación Eólica: Enfoque Práctico," pp. 10–12, 2018.
- [23] W. VÁSQUEZ, "Modelación, Simulación Y Control De Aerogeneradores Con Generador De Inducción Doblemente Alimentado Utilizando," no. marzo, 2014.
- [24] E. Luis and B. Andres, "Modelo Matemático De Un Aerogenerador Mathematical Model of a Wind Turbin," pp. 48–60, 2009.
- [25] Henry Nuñez, "Modelación y diseño de Generación Eólica con Simulación en estado Estacionario y Dinámico de Máquinas full



- Converter y DFIG,” Universidad Politécnica Salesiana., 2020.
- [26] V. Mazzone and E. Pid, “Controladores PID,” 2002.
- [27] R. Hernandez, “Acciones de Control PID,” pp. 1–29, 2002.
- [28] Suárez Velázquez Pamela, “Impacto de la Generación Eólica y Solar en el Sistema Eléctrico de Baja California Norte,” *Inst. Politécnico Nac.*, p. 213, 2010.
- [29] M. Bravo, D. Casas, and G. Q. De Bastera, “Balanceo de cargas en los circuitos de distribución de un sistema eléctrico aislado que garantiza operación segura ante ocurrencias de averías Balance of loads in the distribution circuits of an isolated electrical system guaranteeing safe operation in th,” vol. 3461, pp. 1–19.
- [30] İ. Çetinbaş, B. Tamyürek, and M. Demirtaş, “Sizing optimization and design of an autonomous AC microgrid for commercial loads using Harris Hawks Optimization algorithm,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 245, 2021.
- [31] J. Jafari-Asl, M. E. A. Ben Seghier, S. Ohadi, J. Correia, and J. Barroso, “Reliability analysis based improved directional simulation using Harris Hawks optimization algorithm for engineering systems,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 135, no. February, 2022.

## 6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 3: Matriz de estado del arte.

ÓPTIMO CONTROL DE FRECUENCIA APLICADO A UNA MICRO-RED EÓLICA CON GENERADORES DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADOS USANDO EL ALGORITMO DE HARRIS HAWKS.																									
DATOS				TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Estabilidad de Frecuencia	Micro - redes	Generación Eólica DFIG	Optimización de Harris Hawks	Control Generadores Síncronos	Desbalance de Generación	Desbalance de Carga	Control de Velocidad [W]	Variación de velocidad	limites de frecuencia	Fallas en SEP	Constante de inercia	Límite de Cargabilidad de Cargas	Energías Renovables	Algoritmo de Optimización HHO	Controladores PID	Minimización variación de Frecuencia	Regulación Primaria de Frecuencia.	Simulación de flujos de Potencia	Optimización de Harris Hawks.	Respuesta Óptima del Control al Sistema	
1	2013	Estabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia con Generación Renovable	127	☒					☒	☒					☒							☒		☒	
2	2019	Microrredes – una revisión metodológica en el contexto actual de los sistemas eléctricos	0		☒									☒			☒								
3	2019	Estadística del sector eléctrico ecuatoriano - Folleto resumen.	47																	☒					
4	2015	La gestión de la demanda de electricidad	50													☒	☒				☒				
5	2013	Microrredes en la red	67		☒															☒					

		eléctrica del futuro - caso Huatacondo																				
6	2018	El Mercado Eléctrico Ecuatoriano Y Su Incidencia En Los Altos Costos De Las Tarifas De Energía Eléctrica	8		✘													✘				
7	2020	Resolución No. ARCONEL-006/2020	260									✘		✘	✘			✘				
8	2017	Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas de Colombia	117		✘								✘		✘						✘	
9	2017	Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad	102			✘					✘	✘		✘				✘				
10	2014	Estabilidad de frecuencia de microrredes híbridas fotovoltaicas-batería-hidroeléctricas controladas jerárquicamente	1		✘	✘					✘				✘			✘	✘			✘

**ÓPTIMO CONTROL DE FRECUENCIA APLICADO A UNA MICRO-RED EÓLICA CON GENERADORES DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADOS USANDO EL ALGORITMO DE HARRIS HAWKS.**

DATOS	TEMÁTICA	FORMULACION DEL PROBLEMA	RESTRICCIONES DEL PROBLEMA	PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA	SOLUCIÓN PROPUESTA
-------	----------	--------------------------	----------------------------	--------------------------------------	--------------------

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Estabilidad de Frecuencia	Micro - redes	Generación Eólica DFIG	Optimización de Harris Hawks	Control Generadores Síncronos	Desbalance de Generación	Desbalance de Carga	Control de Velocidad [W]	Variación de velocidad	límites de frecuencia	Fallas en SEP	Constante de inercia	Límite de Cargabilidad de Cargas	Energías Renovables	Algoritmo de Optimización HHO	Controladores PID	Minimización variación de Frecuencia	Regulación Primaria de Frecuencia.	simulación de flujos de Potencia	Optimización de Harris Hawks.	Respuesta Óptima del Control al Sistema	
1	2018	Estabilidad De Frecuencia De Un Sistema Interconectado Con Alta Penetración De Renovable	5	☒		☒				☒						☒				☒			☒		
2	2022	Control de Microrredes AC Abstracto Introducción	1		☒						☒				☒		☒		☒						
3	2013	MODELING AND CONTROL OF A DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR	3								☒			☒					☒			☒			
4	2015	Análisis de Confiabilidad de la Generación Considerando el Ingreso de Energías Renovables No Convencionales en los Sistemas de Potencia	20	☒				☒	☒	☒				☒			☒			☒				☒	
5	2017	Estudio del Control de Frecuencia en Sistemas de Potencia incluyendo Energías Renovables	3	☒							☒						☒							☒	
6	2020	Control Distribuido de Frecuencia en una Microrred Carlos Eduardo Uribe Londo	1	☒				☒	☒					☒			☒			☒				☒	
7	2015	Modelación, Simulación y Control de Aerogeneradores con Generador de Inducción Doblemente Alimentado Utilizando Matlab	21			☒					☒	☒			☒	☒				☒				☒	
8	2020	Load frequency control of solar photovoltaic/wind/biogas/biodiesel generator based isolated microgrid using harris hawks optimization	8	☒		☒	☒												☒	☒	☒				☒
9	2021	Harris hawks optimization algorithm for model order reduction of	2	☒		☒	☒				☒									☒				☒	

		interconnected wind turbines																			
0	2021	Emerging Harris Hawks Optimization based load demand forecasting and optimal sizing of stand-alone hybrid renewable energy systems	4	✗					✗												✗

ÓPTIMO CONTROL DE FRECUENCIA APLICADO A UNA MICRO-RED EÓLICA CON GENERADORES DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADOS USANDO EL ALGORITMO DE HARRIS HAWKS.																													
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA										
				Estabilidad de Frecuencia	Micro - redes	Generación Eólica DFIG	Optimización de Harris Hawks	Control Generadores Síncronos	Desbalance de Generación	Desbalance de Carga	Control de Velocidad [W]	Variación de velocidad	límites de frecuencia	Fallas en SEP	Constante de inercia	Límite de Cargabilidad de Cargas	Energías Renovables	Algoritmo de Optimización HHO	Controladores PID	Minimización variación de Frecuencia	Regulación Primaria de Frecuencia.	simulación de flujos de Potencia	Optimización de Harris Hawks.	Respuesta Óptima del Control al Sistema					
1	2022	Dynamic multi-swarm differential learning harris hawks optimizer and its application to optimal dispatch problem of cascade hydropower stations	0	✗			✗				✗									✗		✗						✗	
2	2018	Modelado Dinámico de Microrredes con Generación Eólica	9			✗				✗					✗		✗				✗							✗	
3	2016	Modelación, Simulación Y Control De	0			✗	✗					✗			✗						✗							✗	

		Aerogeneradores Con Generador De Inducción Doblemente Alimentado Utilizando																						
24	2009	Modelo Matemático De Un Aerogenerador Mathematical Model of a Wind Turbin	10				✗	✗																
25	2020	Modelación y diseño de Generación Eólica con Simulación en estado Estacionario y Dinámico de Máquinas full Converter y DFIG	1				✗																	
26	2002	Controladores PID	48																					
27	2002	Acciones de Control PID	75																					
28	2010	Impacto de la Generación Eólica y Solar en el Sistema Eléctrico de Baja California Norte	28					✗																
29	2019	Balaceo de cargas en los circuitos de distribución de un sistema eléctrico aislado que garantiza operación segura ante ocurrencias de averías	11																					
30	2021	Sizing optimization and design of an autonomous AC microgrid for commercial loads using Harris Hawks Optimization algorithm	5																					

3 1	20 21	Reliability analysis based improved directional simulation using Harris Hawks optimization algorithm for engineering systems	3				✘					✘					✘		✘								
CANTID:	1	1	6	1	0	8	4	5	5	1	2	5	1	7	8	6	1	0	7	8	1	5	4	2	1	0	4
AD:	1	1	6	0	8	4	5	5	2	5	1	7	8	6	0	7	8	5	4	2	0	4	0	4	0	4	

## 6.1 Resumen de indicadores

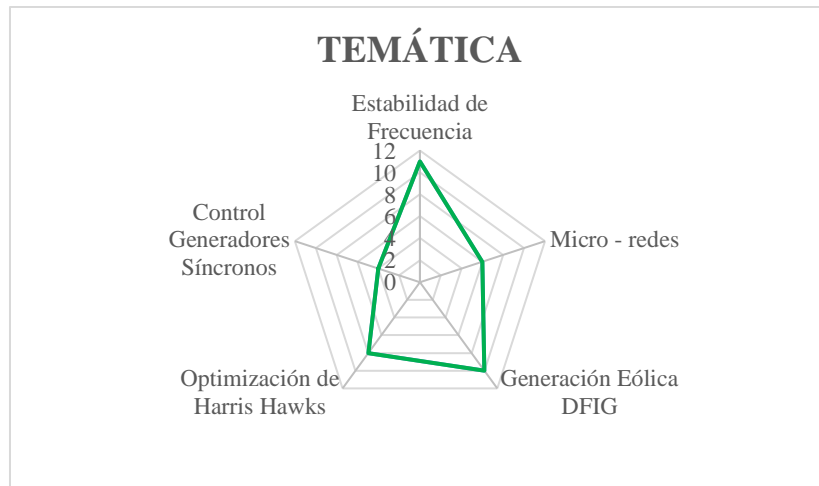


Figura 28. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

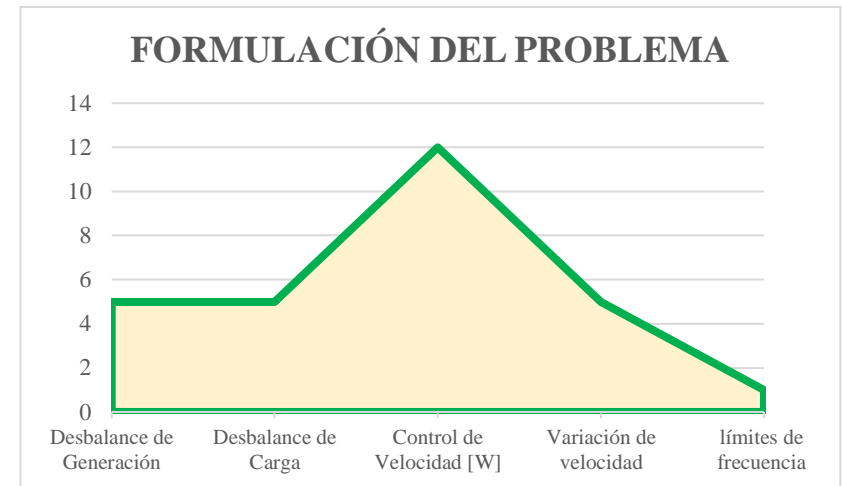


Figura 29. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

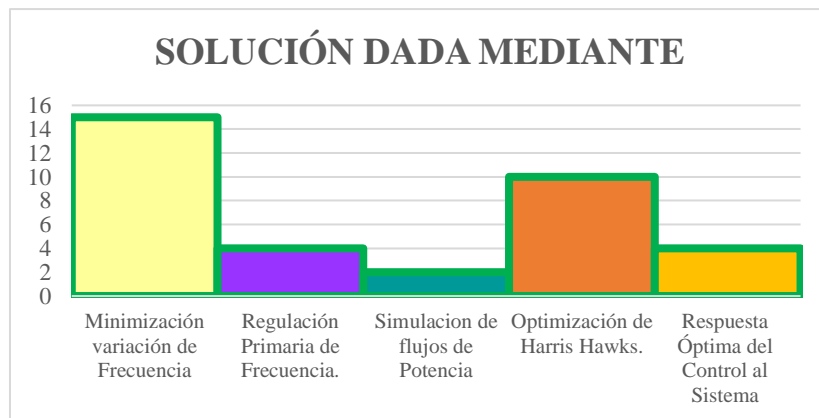


Figura 30. Indicador de solución - Estado del arte.



## 7 Anexos

Tabla 8. Datos de Generación IEEE de 39 barras, DFIG.

Datos de Generación		
GEN	P [MW]	Q [Mvar]
G 01	1000,00	97,74
G 02	331,61	183,55
G 03	650,00	216,29
G 04	632,00	132,93
G 05	508,00	176,43
G 06	650,00	344,08
G 07	560,00	225,58
G 08	540,00	6,43
G 09	830,00	30,36
G 10	250,00	160,65
DFIG	225,00	16,94

Tabla 9. Datos de Máquinas Síncronas, DFIG.

GEN	Angulo del Rotor [pu]	Speed [pu]	Frecuencia
G 01	-1,572	0,118	60,009
G 02	-0,804	0,875	60,008
G 03	-0,711	0,956	60,008
G 04	-0,592	0,929	60,008
G 05	-0,718	0,996	60,008
G 06	-0,702	0,956	60,008
G 07	-0,572	0,941	60,008
G 08	-0,568	0,908	60,008
G 09	-0,438	0,976	60,008
G 10	-1,486	0,294	60,008
DFIG	-1,974	0,910	60,007

Tabla 10. Datos de cargas del sistema IEEE de 39 barras con Micro-red, DFIG.

Datos de Carga		
Carga	P [MW]	Q [Mvar]
Load 03	338,10	2,52
Load 04	525,00	193,20
Load 07	245,49	88,20
Load 08	548,10	184,80
Load 12	7,88	92,40
Load 15	336,00	160,65
Load 16	345,45	33,92
Load 18	165,90	31,50
Load 20	659,40	108,15
Load 21	287,70	120,75
Load 23	259,88	88,83
Load 24	324,03	-96,81
Load 25	235,20	49,56
Load 26	145,95	17,85
Load 27	295,05	79,28
Load 28	216,30	28,98
Load 29	297,68	28,25
Load 31	9,66	4,83
Load 39	1159,20	262,50