



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**APLICACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE
GENERADORES SINCRÓNICOS PARA
MEJORAR LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE
UN SISTEMA DE POTENCIA USANDO
MÉTODOS NUMÉRICOS.**

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

AUTOR: ESTEVAN DAVID CHACÓN RIOFRIO
TUTOR: CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA

Quito -Ecuador
2024

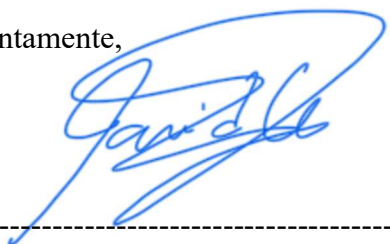
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Estevan David Chacón Riofrio con documento de identificación N ° 0504390311 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, 12 de marzo del año 2024

Atentamente,



Estevan David Chacón Riofrio
0504390311


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

Yo, Estevan David Chacón Riofrio con documento de identificación No. 0504390311, 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 “Aplicación de sistemas de control de generadores sincrónicos para mejorar la estabilidad transitoria de un sistema de potencia usando métodos numéricos.”, 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, 12 de marzo del año 2024

Atentamente,



Estevan David Chacón Riofrio

0504390311

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña con documento de identificación N° 0503503336, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: APLICACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE GENERADORES SINCRÓNICOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE UN SISTEMA DE POTENCIA USANDO MÉTODOS NUMERICOS, realizado por Estevan David Chacón Riofrio con documento de identificación N° 0504390311, 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, 12 de marzo del año 2024

Atentamente,



Ing. Carlos Andrés Barrera Singaña, MSc

0503503336

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	3
2.1	Fundamentos de los SEPs	3
2.1.1	Definición y componentes principales	3
2.1.2	Funcionamiento y operación básica de un SEP	4
2.1.3	Importancia de la estabilidad en los SEPs.....	4
2.2	Generadores Sincrónicos y Sistemas de Control.....	4
2.2.1	Características de los generadores sincrónicos.	5
2.2.2	Modelación del Generador sincrónico.	5
2.2.3	Influencia de los sistemas de control en la dinámica de un SEP.....	6
2.2.4	Modelación AGC y AVR.....	6
2.3	Estabilidad en SEP	7
2.3.1	Estabilidad Transitoria	8
2.4	Métodos Numéricos en la Ingeniería Eléctrica	9
2.4.1	Aplicaciones de los MN en la modelación y análisis de SEPs.....	9
2.5	Métodos numéricos	10
2.5.1	Método Paso a Paso.....	10
2.5.2	Método de Euler	11
2.5.3	Método de Euler Modificado.	11
2.5.4	Método de Runge-Kutta de 4to orden.	12
3	Formulación del problema	12
3.1	Pseudocódigo del método Euler	14
3.2	Pseudocódigo del método Euler Modificado	14
3.3	Pseudocódigo del método Runge Kutta	15
3.4	Pseudocódigo del método Paso a Paso.....	15
4	Metodología	16
4.1	Parámetros del sistema caso 1	16
4.2	Parámetros del sistema caso 2.....	16
5	Análisis de resultados.....	17
5.1	Análisis de prueba Caso 1	17
5.1.1	Caso 1 Sin Reguladores.....	17
5.1.2	Caso 1 Con Reguladores.	18
5.2	Análisis de prueba Caso 2	18
5.2.1	Caso 2 Sin Reguladores.....	19

5.2.2	Caso 2 Con Reguladores.....	20
6	Conclusiones	20
6.1	Trabajos futuros.....	20
7	Referencias.....	21
7.1	Matriz de Estado del Arte.....	24
7.2	Resumen de Indicadores.....	27
8	Anexos.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes principales del SEP.....	4
Figura 2. Características de los generadores síncronos.....	5
Figura 3. Circuito equivalente del Generador Síncronico.....	5
Figura 4. Modelación de un regulador de velocidad.....	7
Figura 5. Modelación de un regulador de voltaje.....	7
Figura 6. Metodo Paso a Paso.....	10
Figura 7. Metodo de Runge-Kutta de 4to orden.....	12
Figura 8. Sistema IEEE de 9 barras.....	16
Figura 9. Falla trifasica en barra 7 apertura de la línea 7-5 en modelo de 9 barras	17
Figura 10. Diferencia Angular Sin Reguladores y Metodos Números.....	17
Figura 11. Zoom de Diferencia Angular Sin Reguladores y Métodos Números	18
Figura 12. Diferencia Angular Con Reguladores y Métodos Números	18
Figura 13. Falla trifasica en barra 7 apertura de la línea 7-5 en modelo de 9 barras... ..	19
Figura 14. Diferencia Angular Sin Reguladores y Metodos números.	19
Figura 15. Zoom de Diferencia Angular Sin Reguladores y Metodos Números	19
Figura 16. Diferencia Angular Con Reguladores y Metodos Números.	20
Figura 17. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	27
Figura 18. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	27
Figura 19. Indicador de solución - Estado del arte.....	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parametros del caso 1.....	16
Tabla 2: Parametros del caso 2.....	17
Tabla 3: Datos Caso 1 sin Reguladores $t=1.5(s)$	18
Tabla 4: Datos Caso 1 con Reguladores $d(2-1)$ a $t=0.07(s)$ y $d(3-1)$ a $t=0.215(s)$	18
Tabla 5: Datos Caso 2 sin Reguladores $t=1.5(s)$	19
Tabla 6: Datos Caso 2 con Reguladores $d(2-1)$ a $t=0.865(s)$ y $d(3-1)$ a $t=0.845(s)$	20
Tabla 7: Matriz de estudio del arte.....	24

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE GENERADORES SINCRÓNICOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE UN SISTEMA DE POTENCIA USANDO MÉTODOS NUMÉRICOS.

Resumen

El presente documento está orientado a la estabilidad angular desempeña un papel crucial en los Sistemas de Potencia, ya que su análisis y comprensión son fundamentales para restaurar las condiciones normales de operación, especialmente el "sincronismo", de las máquinas del sistema después de sufrir una perturbación. En este trabajo, se aborda esta problemática mediante el desarrollo de un estudio que examina el comportamiento de un sistema de potencia durante el período transitorio después de una perturbación. Se incorporan generadores con reguladores de velocidad y voltaje en el análisis. Además, se realiza una comparativa de diversos métodos numéricos aplicados para resolver la ecuación de oscilación en este contexto, con el objetivo de evaluar su eficacia y precisión en la predicción del comportamiento del sistema durante el proceso de recuperación tras una perturbación.

Palabras Clave: Estabilidad angular, Sistemas de potencia, perturbaciones, reguladores de voltaje y velocidad, métodos numéricos.

Abstract

This document is focused on angular stability, a crucial aspect in Power Systems, as its analysis and comprehension are essential for restoring normal operating conditions, particularly "synchronization," of the system machines following a disturbance. In this study, we address this issue by developing an examination of the power system's behavior during the transient period after a disturbance. The analysis incorporates generators with speed and voltage regulators. Furthermore, a comparative assessment of various numerical methods applied to solve the oscillation equation in this context is conducted, aiming to evaluate their effectiveness and precision in predicting the system's behavior during the recovery process after a disturbance.

Keywords: Angular Stability, Power systems, Disturbance, Voltage and speed regulators, numerical methods.

1 Introducción

En el contexto contemporáneo de la ingeniería eléctrica, el foco en la estabilidad y confiabilidad en los sistemas eléctricos de potencia (SEP) ha cobrado una relevancia sin precedentes. Esta importancia es una respuesta directa a los retos y exigencias que enfrentan estos sistemas en su día a día. Diseñados para ser robustos y resilientes, los SEPs aún se ven afectados por un sinnúmero de perturbaciones, las cuales pueden emerger de fuentes tanto internas como externas al sistema [1].

Estas perturbaciones pueden ser de diversa índole. Desde el comportamiento variable de los consumidores y las demandas inesperadas de energía que introducen variaciones en la carga, hasta situaciones más críticas como fallas en componentes esenciales del sistema como: transformadores, líneas de transmisión, generadores que amenazan con interrumpir el flujo eléctrico. Sumado a ello, la generación de energía no es siempre constante [2]. Las fuentes renovables, por ejemplo, son susceptibles a variabilidades climáticas, y los sistemas de generación convencional pueden enfrentar interrupciones o reducciones en su capacidad. Estos elementos convergen en un escenario donde la operación eficiente y segura del SEP es puesta a prueba continuamente [3].

La gravedad de estas perturbaciones no puede ser subestimada. Pequeñas fluctuaciones pueden ser manejables y corregidas con sistemas de control (SC) adecuados. Sin embargo, eventos más severos pueden llevar a fenómenos adversos con repercusiones profundas. Las caídas de voltaje y las alteraciones en la frecuencia, por ejemplo, no solo afectan la calidad de la energía suministrada, sino que también pueden dañar equipos y dispositivos conectados al sistema. Aún más grave, en situaciones extremas, se pueden presentar blackouts o apagones

totales, dejando sin suministro eléctrico a vastas zonas geográficas. Las implicancias de estos apagones van más allá del mero inconveniente; pueden tener efectos catastróficos en infraestructuras críticas como hospitales, sistemas de comunicación y transportes, y, sobre todo, en la vida diaria de la población que depende del suministro eléctrico para sus actividades cotidianas [4].

Por tanto, el compromiso con la estabilidad de los SEPs es más que una cuestión técnica; es una responsabilidad social y económica. Garantizar una operación estable no solo protege las inversiones en infraestructura y equipos, sino que asegura la vida de las personas. [1].

El presente artículo científico analiza meticulosamente la estabilidad angular transitoria de un SEP, con especial énfasis en la comparación de diferentes técnicas numéricas. Esta inmersión en métodos como el Paso a Paso, el Runge-Kutta de 4to orden, de Euler Modificado y el Euler, busca discernir entre sus particularidades, ventajas y desventajas al resolver ecuaciones diferenciales no lineales inherentes al modelamiento del problema en cuestión. En [5] se menciona que estos métodos, robustos y ampliamente empleados, presentan variaciones en su precisión dada la forma en que procesan los datos, y esta investigación pretende arrojar luz sobre qué enfoque resulta más preciso y eficiente bajo diferentes escenarios.

La adopción de un enfoque práctico es primordial para este estudio. Se hará uso del software MATLAB, herramienta de referencia en el ámbito de la simulación y modelamiento, basándose al sistema de nueve barras designado por la IEEE. Este modelo servirá como base para someter a prueba y analizar los resultados de los diferentes métodos numéricos en estudio, observando cómo reaccionan ante distintas condiciones y contingencias.

Bajo la superficie de esta investigación subyace una misión claramente definida: tender un camino entre la teoría y la práctica, llevando a cabo un profundo análisis comparativo de los diversos métodos numéricos que se emplean en el ámbito de la ingeniería eléctrica. Este análisis no es un fin en sí mismo, sino un medio para iluminar y guiar tanto a la comunidad técnica como a la academia. En un planeta el cual la tecnología avanza exponencialmente, el dominio y comprensión de estas herramientas se tornan esenciales [6].

La complejidad de la dinámica del sistema eléctrico, con sus intrincadas interconexiones y dependencias, exige una comprensión cabal. En particular, es crucial comprender cómo los SC tradicionales, incorporados en los generadores sincrónicos, interactúan e influyen en la estabilidad transitoria del SEP. Estos sistemas de control, que han sido el pilar de muchos SEPs durante décadas, presentan características y comportamientos que pueden tener ramificaciones significativas en la respuesta del sistema ante perturbaciones [7].

Pero esta investigación es más profunda que una fácil comprensión teórica. El propósito principal es dotar a los profesionales, investigadores y estudiantes con herramientas prácticas y conocimientos sólidos. Estas herramientas no son meramente conceptuales, sino que tienen aplicaciones directas en el diseño, planificación e intervención de los SEPs. Con este arsenal de conocimiento, los actores clave en el sector eléctrico estarán mejor equipados para tomar decisiones informadas, optimizar procesos y, sobre todo, garantizar que los sistemas eléctricos operen de manera eficiente y segura [8].

2 Marco teórico

El marco teórico del artículo científico se enfoca en los SEPs, que son la base de la

infraestructura eléctrica moderna, abordando su definición, componentes clave, funcionamiento, y la crucial importancia de la estabilidad en estos sistemas. Se explora la relevancia de los generadores sincrónicos y sistemas de control, así como la necesidad de métodos numéricos en la ingeniería eléctrica para resolver problemas complejos en SEP.

Además, se presentan métodos numéricos específicos como el método Paso a paso, el Runge-Kutta de 4to orden, de Euler Modificado y el Euler, destacando su aplicabilidad en la resolución de incidentes en este campo.

2.1 Fundamentos de los SEPs

Los SEPs representan la columna vertebral de la infraestructura eléctrica moderna, siendo indispensables para el suministro y distribución de energía en la vida cotidiana. Estos sistemas, compuestos por una red interconectada de componentes, facilitan el trayecto como punto de partida su generación y punto de llegada el consumidor final. El adecuado funcionamiento y la estabilidad de un SEP son esenciales no solo para la eficiencia energética y económica, sino también para la salvaguardia y bienestar de los humanos.

En este contexto, es fundamental comprender la definición, componentes, funcionamiento y la importancia de la estabilidad en los SEPs. A continuación, se desglosarán estos aspectos esenciales que configuran la dinámica y operatividad de los SEPs [9].

2.1.1 Definición y componentes principales

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) pueden definirse como conjuntos interconectados de componentes eléctricos desarrollados para generar, transferir y distribuir energía eléctrica a diversas cargas o consumidores [10]. Estos sistemas, de naturaleza compleja, están compuestos por una serie de elementos

esenciales que aseguran su adecuado funcionamiento, apreciar la Figura 1.



Figura 1. Componentes principales del SEP.

2.1.2 Funcionamiento y operación básica de un SEP

La operación básica de un SEP inicia con la generación de electricidad en plantas generadoras. Una vez producida, esta energía es elevada a altos voltajes mediante transformadores para ser transmitida eficientemente a largas distancias por las líneas de transmisión.

Las subestaciones juegan un papel crucial en la gestión y distribución de esta energía, reduciendo el voltaje para adaptarla a niveles adecuados de distribución o consumo. Las redes de distribución, a su vez, canalizan esta energía hacia las cargas o consumidores finales. Es esencial mantener un equilibrio

entre la generación y el consumo en todo momento para garantizar la estabilidad y calidad del servicio eléctrico [11].

2.1.3 Importancia de la estabilidad en los SEPs.

La estabilidad en un SEP refiere a la capacidad de mantener el sincronismo de los generadores dentro de los límites operacionales, después de haber experimentado una perturbación. Esta cualidad es esencial para la continuidad y fiabilidad del suministro eléctrico. Si un SEP no puede restablecerse tras una perturbación, puede dar lugar a fenómenos indeseables como oscilaciones de potencia, variaciones significativas de voltaje y, en casos extremos, a interrupciones totales del servicio o blackouts [10].

Estas interrupciones no solo resultan en pérdidas económicas significativas, sino que también puede designar un riesgo hacia la integridad de las personas y afectar la infraestructura crítica. Por lo tanto, garantizar la estabilidad de los SEPs no es solo una cuestión técnica, sino también una prioridad en términos de seguridad y bienestar social.

2.2 Generadores Sincrónicos y Sistemas de Control

En el vasto dominio de la ingeniería eléctrica, los generadores sincrónicos representan piezas esenciales para la conversión de energía, mientras que los sistemas de control aseguran su operación óptima dentro de los SEP. Los generadores sincrónicos, a través de principios de inducción electromagnética, transforman la energía mecánica en eléctrica, siendo esenciales para alimentar innumerables aplicaciones que dependen de la electricidad. Sin embargo, su eficiencia y eficacia no serían posibles sin los sistemas de control, que aseguran que estos generadores operen de manera sincrónica y estable. Estos sistemas no solo garantizan una entrega de energía confiable, sino que

también son cruciales para mantener la estabilidad en el panorama general de un SEP. A continuación, se explorarán en detalle las características, principios de funcionamiento de los generadores sincrónicos y la influencia vital de los sistemas de control en la dinámica de un SEP [12].

2.2.1 Características de los generadores sincrónicos.

En [13] se menciona que los generadores sincrónicos son máquinas eléctricas rotativas que convierten la energía mecánica en energía eléctrica por medio del principio de inducción electromagnética. A continuación, en la Figura 2 se describen algunas características:

Sincronismo

- Estos generadores operan en sincronismo con la frecuencia del sistema eléctrico al cual están conectados. Esto significa que la velocidad de rotación del rotor es directamente proporcional a la frecuencia de la red.

Constitución

- Están compuestos principalmente por un rotor, que puede ser de tipo saliente o cilíndrico, y un estator. El estator contiene bobinados donde se induce la corriente alterna debido al movimiento rotativo del rotor.

Excitación

- La excitación del generador sincrónico se realiza mediante un sistema de corriente continua que alimenta el rotor. Esta corriente de excitación produce un campo magnético que, al interactuar con los bobinados del estator, genera la corriente alterna.

Regulación

- La variación de la corriente de excitación permite regular la voltaje generada en el estator. Asimismo, la carga conectada al generador influye en el ángulo de fase entre la voltaje y la corriente, conocido como ángulo de potencia

Figura 2. Características de los generadores sincrónicos.

2.2.2 Modelación del Generador sincrónico.

El empleo del modelo de la máquina sincrónica es esencial en análisis como cortocircuitos, estabilidad y transitorios en sistema eléctricos. Sin embargo, no resulta obligatorio al construir la matriz de admitancias para el flujo de carga. El

modelamiento se realizará con un enfoque exclusivamente académico.

Considerando un generador en estado estable se representa como una fuente de voltaje y una impedancia en serie.

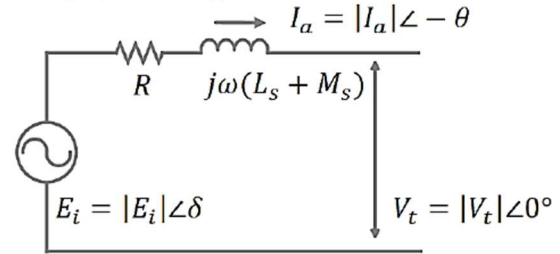


Figura 3. Circuito equivalente del Generador Sincrónico.

Donde:

V_t : Voltaje en los terminales del generador.

$j\omega(L_s + M_s)I_a$: Caída de voltaje en la reactancia propia y mutua de armadura.

$R_a I_a$: Caída de voltaje en la resistencia de armadura.

E_i : Voltaje interno del generador.

El circuito equivalente del generador ilustrado en la figura 3 se determinan las siguientes ecuaciones:

$$V_t = E_i - I_a Z_d \quad (1)$$

Donde Z_d es la impedancia sincrónica y se encuentra definida por:

$$Z_d = R_a + jX_d = R_a + j\omega(L_s + M_s) \quad (2)$$

En cambio, en un estado dinámico el generador se representa con el principio fundamental de la dinámica de rotación.

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (3)$$

Donde:

J : Momento de inercia de la masa del rotor.

θ : Desplazamiento angular con respecto al eje de estacionario.

T_m : Torque mecánico.

T_e : Torque eléctrico.

Además, cuando un cuerpo en puesto en movimiento trata de oponerse se lo constituye como momento de inercia.

$$J = \frac{1}{2} mR^2 \quad (4)$$

Donde m es la masa del cuerpo y R es el radio del cuerpo (rotor). En otra perspectiva, la variación del ángulo de potencia δ en el análisis de la estabilidad angular puede ser representado en relación con un eje de referencia que experimente un giro a la velocidad sincrónica.

$$\theta_m = \omega_s t + \delta_m \quad (5)$$

Donde:

θ_m : Posición angular con respecto al eje de referencia.

ω_s : Velocidad sincrónica del generador

δ_m : Desplazamiento angular desde el eje de referencia

El momento de inercia puede ser referido como el momento de inercia del rotor, y se denota comúnmente con la letra M , que a su vez está expresado en función de H , la constante de inercia.

$$M = \frac{2H}{\omega_s} S_B \quad (6)$$

Al sustituir las ecuaciones (4), (5), (6), en la ecuación (3), se obtiene finalmente la ecuación de oscilación [16].

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (7)$$

2.2.3 Influencia de los sistemas de control en la dinámica de un SEP.

Los sistemas de control juegan un papel fundamental en la operación de los generadores sincrónicos y, por ende, en la dinámica general de un SEP, a continuación se menciona que influye los sistemas de control en la dinámica del SEP [14]:

Regulación de Voltaje: Los reguladores automáticos de voltaje (AVR, por sus siglas en inglés) mantienen el voltaje del generador dentro de límites preestablecidos. Estos dispositivos ajustan la corriente de excitación en función de las variaciones de voltaje, asegurando así una entrega de energía estable al sistema.

Regulación de Velocidad y Frecuencia:

Los reguladores de velocidad o gobernadores ajustan la entrada de energía mecánica al generador para mantener una velocidad constante, lo que se traduce en una frecuencia de generación estable. Esto es vital, especialmente en sistemas interconectados donde la coherencia en la frecuencia es esencial.

Estabilidad y Respuesta: Los sistemas de control ayudan a garantizar la estabilidad del generador frente a perturbaciones. Por ejemplo, en caso de una carga adicional súbita, el regulador de velocidad (RV) aumentará el ingreso de energía mecánica para contrarrestar la caída de velocidad, mientras que el AVR ajustará la excitación para mantener el voltaje.

Interacción con otros Componentes:

La respuesta de un generador sincrónico y sus sistemas de control puede influir en la operación de otros componentes en un SEP, como líneas de transmisión, transformadores y otros generadores. Por ello, es vital que los sistemas de control estén adecuadamente coordinados y calibrados para asegurar una operación armónica del SEP en su conjunto.

2.2.4 Modelación AGC y AVR.

En un generador sincrónico, se exploran dos escenarios de regulación: uno mediante un regulador de voltaje y otro mediante un RV. Cuando el RV experimenta modificaciones, provoca alteraciones en el torque mecánico. Este torque está condicionado tanto por la variación de velocidad como por la función de transferencia del RV y la fuente principal de energía (turbina), como se ilustra en la figura 4[15].

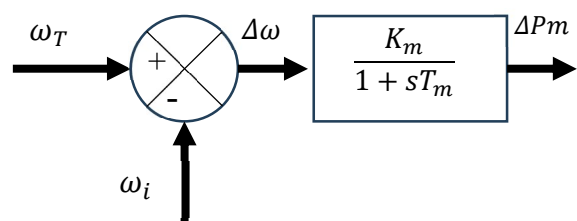


Figura 4. Modelación de un regulador de velocidad

$$\frac{d\Delta Pm}{dt} = \frac{Km}{Tm} [\omega_T - \omega_i] - \frac{\Delta Pm}{Tm} \quad (8)$$

Donde:

ΔPm : Potencia mecánica.

$\Delta\omega$: Variación Angular.

ΔKm : Ganancia.

Tm : Constante de tiempo característica del RV.

ω_T : Velocidad Angular Inicial.

ω_i : Velocidad Angular Final.

Los AVR's poseen la capacidad de identificar alteraciones en el voltaje de salida. El diagrama de bloques presenta un modelo que establece una relación en el dominio, entre la variación del voltaje de excitación y voltaje entre los terminales del generador, como se representa en la figura 4[15].

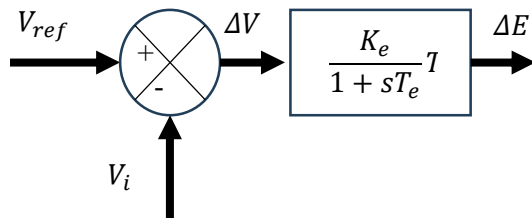


Figura 5. Modelación de un regulador de voltaje

(9)

$$\frac{d\Delta E}{dt} = \frac{K_e}{T_e} [V_{ref} - V_i] - \frac{\Delta E}{T_e}$$

Donde:

V_{ref} : Diferencia de Potencial de Referencia.

V_i : Velocidad Angular Final.

K_e : Ganancia.

T_e : Constante de tiempo característica del AVR.

ΔV : Desplazamiento de Voltaje.

ΔE : Diferencia de Potencial Interno Generador.

2.3 Estabilidad en SEP

La estabilidad en sistemas eléctricos se refiere a la cualidad del sistema de volver a un estado operativo estable o equilibrio luego de haber sido sometido a una perturbación, ya sea esta pequeña o grande. Es una propiedad esencial que garantiza que el sistema eléctrico puede continuar operando de manera adecuada y segura frente a variaciones inesperadas, evitando fenómenos indeseables como la pérdida de sincronismo, oscilaciones persistentes o incluso el colapso total del sistema [2]. La estabilidad en los SEPs se clasifica de la siguiente manera:

Estabilidad de Ángulo: Se relaciona con la cualidad de las máquinas sincrónicas (como generadores) para mantener su sincronismo frente a perturbaciones. Si tras una perturbación, las máquinas pueden volver a operar con una diferencia de ángulo estable y constante entre ellas, se considera que el sistema es angularmente estable [16].

a. *Estabilidad Transitoria:* Evalúa la cualidad del sistema de mantener el sincronismo después de escenarios adversos significativos y repentinos, como podría ser una falla en una línea de transmisión [16].

b. *Estabilidad a Pequeña Señal:* Analiza la capacidad del sistema de enfrentar perturbaciones pequeñas y continuas, como variaciones menores en la carga o la generación [16].

Estabilidad de Frecuencia: Se refiere a la cualidad del sistema eléctrico de mantener su frecuencia dentro de límites aceptables luego de una perturbación. La estabilidad de frecuencia es esencial en sistemas interconectados para garantizar que todas las partes del sistema operen coherentemente [17].

Estabilidad de Voltaje: Se concentra en la cualidad del sistema de mantener niveles de voltaje dentro de rangos preestablecidos tras una perturbación. Un sistema inestable en voltaje podría

experimentar caídas o aumentos significativos de voltaje que podrían dañar equipos o afectar la calidad del servicio eléctrico [17].

Estabilidad Dinámica: Analiza la respuesta del sistema a perturbaciones considerando todos sus componentes y sus interacciones. Incorpora aspectos tanto de estabilidad angular como de voltaje y frecuencia, y se centra en la respuesta temporal del sistema hasta alcanzar un nuevo equilibrio [17].

2.3.1 Estabilidad Transitoria

La estabilidad transitoria se dirige a la habilidad del SEP para mantener su sincronismo en respuesta a grandes perturbaciones repentinas, tales como cortocircuitos, fallas en líneas, desconexiones súbitas de grandes cargas o generadores, entre otros [18].

Cuando se presenta una gran perturbación, la energía cinética almacenada en los generadores se redistribuye, causando una variación en los ángulos de fase entre generadores sincrónicos. Si, tras la perturbación, los generadores pueden reajustar sus ángulos de fase y volver a un estado estable de operación sin perder el sincronismo, se dice que el sistema tiene estabilidad transitoria.

La estabilidad transitoria de un SEP está influenciada por varios factores clave. En primer lugar, las características del sistema, como su tamaño, configuración y nivel de carga desempeñan un papel fundamental. Un sistema más grande o altamente interconectado tiende a tener una mayor inercia y, por lo tanto, una mayor capacidad para absorber perturbaciones. Además, la ubicación y naturaleza de la perturbación son determinantes. Un cortocircuito cercano a un generador principal puede tener un impacto más significativo que uno en una parte remota del sistema [19].

Otro factor importante es la respuesta de los equipos de control. Los SC, como los AVR y los gobernadores, pueden actuar de manera efectiva para contrarrestar las perturbaciones y perfeccionar la estabilidad transitoria. Además, las características de los generadores, como su inercia, capacidad y configuración, también influyen en cómo reaccionan a las perturbaciones. Los generadores con mayor inercia pueden proporcionar una mayor resistencia a cambios bruscos en el ángulo de fase [19].

Para mejorar la estabilidad transitoria, se utilizan diversas técnicas y estrategias. Esto incluye la reconfiguración del sistema mediante la operación de interruptores y la desconexión de líneas o cargas específicas. Además, se pueden emplear equipos especiales, como condensadores en serie, bobinas de compensación y dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission Systems), para mejorar la estabilidad en situaciones críticas [20].

El control de los generadores ejecuta un papel fundamental en la mejora de la estabilidad transitoria, ya que ajusta la operación y respuesta de los generadores mediante gobernadores y sistemas de excitación esto puede ser esencial. Por último, la implementación de métodos de protección, como la detección rápida y el aislamiento de fallas a través de relés y sistemas de protección, puede minimizar el impacto de las perturbaciones en la estabilidad transitoria [20].

En síntesis, la estabilidad transitoria es una consideración esencial en la actuación y diseño de SEP, ya que afecta directamente a la confiabilidad y seguridad del suministro eléctrico. Garantizar una adecuada estabilidad transitoria es crucial para prevenir interrupciones de servicio, daños a equipos y apagones a gran escala, y requiere una comprensión profunda de los factores y estrategias mencionados anteriormente por parte de los ingenieros eléctricos [21].

2.4 Métodos Numéricos en la Ingeniería Eléctrica

La ingeniería eléctrica, como muchas otras disciplinas de la ingeniería, a menudo se enfrenta a problemas que son matemáticamente complejos y no pueden ser resueltos de manera analítica. En tales casos, los métodos numéricos emergen como herramientas indispensables que permiten aproximar soluciones con un grado razonable de precisión [22].

Los métodos numéricos consisten en estrategias para modelar problemas matemáticos, permitiendo su resolución mediante operaciones aritméticas. Estos métodos brindan soluciones aproximadas pero prácticas a problemas que, de otra manera, serían intratables [22].

En el campo de la ingeniería eléctrica, dichos métodos numéricos desempeñan un papel crucial en diversas aplicaciones que abarcan desde el análisis de circuitos eléctricos hasta la planificación y operación de SEP, pasando por el desarrollo y simulación de SC. Estos métodos se caracterizan por varias propiedades fundamentales. En primer lugar, se centran en la obtención de soluciones aproximadas en contraste con las soluciones analíticas, que proporcionan respuestas exactas. Esta aproximación es especialmente útil cuando se requieren soluciones lo suficientemente precisas para satisfacer los objetivos específicos de ingeniería [23].

La interactividad es otra característica destacada de los métodos numéricos. En muchos casos, estos métodos se basan en procesos iterativos en los que una solución inicial se ajusta y mejora repetidamente hasta alcanzar el nivel deseado de precisión. Esta capacidad de refinamiento iterativo es valiosa en la resolución de problemas complejos y no lineales que son comunes en la ingeniería eléctrica [23].

La flexibilidad es una ventaja significativa de los métodos numéricos, ya que pueden adaptarse a una amplia

variedad de problemas y condiciones. Esta versatilidad permite a los ingenieros eléctricos aplicar estos métodos en diferentes contextos, desde la simulación de circuitos electrónicos hasta la optimización de sistemas de control [24].

Sin embargo, es importante destacar que los métodos numéricos a menudo dependen de la capacidad computacional, ya que implican cálculos repetitivos y la manipulación de gran conjunto de información. Por lo tanto, el uso de computadoras se vuelve esencial para aplicar eficazmente estos métodos en la ingeniería eléctrica moderna [24].

2.4.1 Aplicaciones de los métodos numéricos (MN) en la modelación y análisis de SEPs.

Los SEPs son entidades complejas que comprenden numerosos componentes interconectados y operan bajo una multitud de condiciones. La modelación y análisis preciso de estos sistemas es esencial para garantizar su funcionamiento eficiente, seguro y confiable. En este contexto, los métodos numéricos han demostrado ser herramientas fundamentales [25]. A continuación, se destacan las principales aplicaciones:

Flujo de Potencia: Una de las aplicaciones más comunes de los métodos numéricos en SEPs es el cálculo del flujo de potencia. Estos métodos permiten determinar voltajes, corrientes y potencias en todas las barras y líneas de un sistema, considerando la topología y las condiciones de operación dadas.

Análisis de Estabilidad: El estudio de la estabilidad de un SEP, en particular la estabilidad transitoria y dinámica, requiere solucionar ecuaciones diferenciales no lineales. Métodos numéricos, como Runge-Kutta de 4to orden, son ampliamente utilizados para este propósito.

Análisis de Cortocircuitos: Determinar las corrientes de cortocircuito y los voltajes resultantes en diferentes puntos del sistema

es esencial para el diseño y coordinación de la protección. Los métodos numéricos facilitan estos cálculos.

Optimización de la Operación: Estas técnicas ayudan a determinar el despacho óptimo de generación, la ubicación óptima de reactores y condensadores, así como la planificación de la expansión del sistema.

Simulación Electromagnética Transitoria (EMT): Para estudiar transitorios rápidos como sobrevoltajes debidos a maniobras o descargas atmosféricas, los métodos numéricos ofrecen soluciones precisas.

Análisis Armónico: Dada la proliferación de cargas no lineales y dispositivos electrónicos de potencia, el análisis armónico se ha vuelto crucial. Los métodos numéricos permiten evaluar la distorsión armónica y su impacto en el sistema.

2.5 Métodos numéricos

Los métodos numéricos son herramientas por medio de las cuales se formula un problema matemático de manera que pueda ser resuelto usando operaciones aritméticas. Estos métodos son especialmente útiles para problemas que no pueden ser resueltos mediante procedimientos analíticos o que resultarían extremadamente complicados o impracticables si se intentaran resolver de esa manera. Los métodos numéricos aprovechan la capacidad de las computadoras para realizar rápidamente grandes cantidades de cálculos, y son esenciales en muchas áreas de la ingeniería y la ciencia [26].

2.5.1 Método Paso a Paso.

El método de Paso a Paso, también conocido como método de pasos de tiempo explícitos, es un enfoque numérico utilizado para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias (EDOs) y ecuaciones en derivadas parciales (EDPs) en el contexto de la dinámica de sistemas continuos, como los sistemas dinámicos.

Este método descompone el proceso en pequeños pasos discretos de tiempo y utiliza aproximaciones iterativas para avanzar en el tiempo. El método de Paso a Paso funciona dividiendo el tiempo en pequeños incrementos discretos y calculando las soluciones en cada paso de tiempo utilizando aproximaciones numéricas. El proceso general es el siguiente [26]:

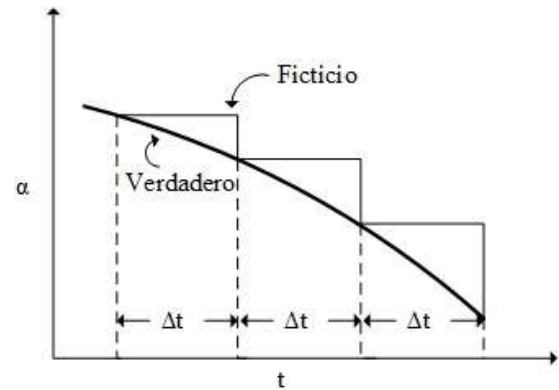


Figura 6. Método Paso a Paso.

$$P_{a(k-1)} = P_m - P_{max} \text{sen}(\delta_{k-1}) \quad (10)$$

$$\Delta\delta_k = \Delta\delta_{(k-1)} + \frac{\pi f}{H} (\Delta t)^2 P_{a(k-1)}$$

$$\delta_k = \delta_{(k-1)} + \Delta\delta_k$$

Donde:

P_a : Potencia de Aceleración

P_m : Potencia Mecánica

P_{max} : Potencia Máxima

δ_k : Ángulo Delta del Generador

$\Delta\delta_k$: Variación de Angulo

Δt : Variación del tiempo

k : Numero de iteraciones

f : Frecuencia del sistema

H : Constante de Inercia

Discretización en el Tiempo: Divide el intervalo de tiempo de interés en pasos discretos de tamaño igual. Esto crea una secuencia de tiempos $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ donde t_0 es el tiempo inicial y t_n es el tiempo final.

Condiciones Iniciales: Inicializa las condiciones iniciales para todas las

variables del sistema en t_0 . Esto significa que se conoce los valores de todas las variables en el momento t_0 .

Iteración en el tiempo: Utiliza un esquema numérico para avanzar en el tiempo desde t_0 hasta t_n calculando las aproximaciones de las variables en cada paso.

Actualización de variables: En cada paso de tiempo t_k , actualiza las variables del sistema basándose en las aproximaciones calculadas en el paso anterior (en t_{k-1}) y las ecuaciones que gobiernan el sistema. Esto implica utilizar una técnica numérica para resolver las EDOs o EDPs y obtener una nueva aproximación de las variables en t_k .

Avances en el tiempo: Incrementa k en 1 para avanzar al siguiente paso de tiempo t_{k+1} y repite el proceso desde el Paso anterior hasta que se alcance t_n .

Resultado: Después de completar todas las iteraciones en el tiempo, se obtendrá una serie de aproximaciones de las variables del sistema en distintos momentos t_k que representan la evolución temporal del sistema.

2.5.2 Método de Euler

El Método de Euler es un método numérico utilizado para resolver EDOs de primer orden. Este método es uno de los más simples y se utiliza para aproximar la solución de una EDO en puntos discretos a lo largo de su dominio. La idea principal es dividir el dominio de la variable independiente en pequeños incrementos y utilizar una aproximación lineal para calcular los valores de la función desconocida en estos puntos. La formulación matemática es la siguiente [28]:

$$y_{n+1} = y_n + h \times f(x_n, y_n) \quad (11)$$

Donde:

x_n : Valor actual de la variable independiente.

y_n : Es el valor aproximado de la función y en el punto x_n

y_{n+1} : Es el valor aproximado de y en el punto siguiente x_{n+1}

h : Paso de discretización

El Método de Euler es efectivo para EDOs de primer orden y puede proporcionar aproximaciones razonables de la solución, especialmente cuando el paso de discretización h es pequeño. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el Método de Euler puede no ser adecuado para EDOs con comportamientos no lineales o para resolver EDOs de orden superior, en cuyo caso se pueden requerir métodos numéricos más avanzados [28].

2.5.3 Método de Euler Modificado.

El Método de Euler Modificado, también conocido como Método de Euler Mejorado o Método de Heun, es una mejora del Método de Euler que proporciona una aproximación más detallada de la solución de EDOs de primer orden. Este método es especialmente útil cuando se requiere una mayor precisión y estabilidad que la ofrecida por el Método de Euler estándar. A continuación, se proporciona la formulación matemática [29]:

$$\begin{aligned} k_1 &= h \times f(x_n, y_n) \\ k_2 &= h \times f(x_n + h, y_n + k_1) \\ y_{n+1} &= y_n + \frac{1}{2}(k_1 + k_2) \end{aligned} \quad (12)$$

Donde:

x_n : Es el valor actual de la variable independiente.

y_n : Es el valor aproximado de la función y en el punto x_n

y_{n+1} : Es el valor aproximado de y en el punto siguiente x_{n+1}

h : Paso de discretización

k_1 y k_2 : Son las variables pendientes estimadas en los puntos x_n y x_{n+1}

El Método de Euler Modificado proporciona una mejora en la precisión en comparación con el Método de Euler

estándar, especialmente cuando se requiere una aproximación más detallada de la solución de una EDO [29].

2.5.4 Método de Runge-Kutta de 4to orden.

El Método de Runge-Kutta de 4to orden es una familia de métodos numéricos ampliamente utilizados para resolver EDOs de primer orden o sistemas de EDOs. Los métodos de Runge-Kutta de 4to orden son conocidos por su precisión y versatilidad en la aproximación de soluciones de EDOs.

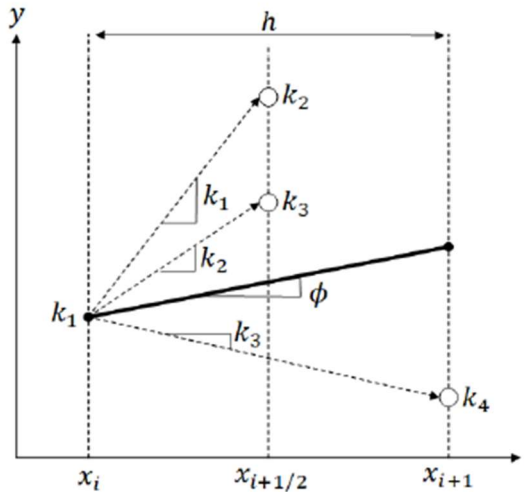


Figura 7. Método de Runge-Kutta de 4to orden 4to Orden [15].

A continuación, se proporciona la formulación matemática [30]:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= h \times f(x_n, y_n) \\
 k_2 &= h \times f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \\
 k_3 &= h \times f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) \\
 k_4 &= h \times f(x_n + h, y_n + k_3) \\
 y_{n+1} &= y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)
 \end{aligned} \quad (13)$$

Donde:

x_n : Valor actual de la variable independiente.

y_n : Valor aproximado de la función y en el punto x_n

y_{n+1} : Es el valor aproximado de y en el punto siguiente x_{n+1}

h : Paso de discretización

k_1, k_2, k_3 y k_4 : Son pendientes calculadas en puntos intermedios.

El Método de Runge-Kutta de 4to orden es especialmente útil para EDOs de alto orden y proporciona una mayor precisión que el Método de Euler. La elección del orden del método (generalmente se utiliza el método RK4, como se describe arriba) y el paso de discretización h pueden ajustarse según la precisión requerida y la estabilidad del método [30].

3 Formulación del problema

La estabilidad transitoria en el SEP constituye un elemento crítico para garantizar un funcionamiento confiable y seguro. La capacidad de mantener el equilibrio frente a perturbaciones, tanto internas como externas, es esencial para prevenir caídas de voltaje, frecuencias inestables y, en última instancia, para evitar apagones catastróficos y daños en los equipos conectados al SEP.

Este estudio se centra en la ejecución de métodos numéricos para el análisis de la estabilidad transitoria, con énfasis en la comparación de cuatro enfoques específicos: el método de Paso a Paso, el Runge-Kutta de 4to orden, de Euler Modificado y el Euler. Estos métodos serán implementados y evaluados en el modelo de nueve barras de la IEEE para sus respectivas pruebas asimismo los casos de estudio planteados.

En el transcurso de la implementación del método de Euler para el análisis de la estabilidad transitoria, se incorporarán al modelo del generador sincrónico dos ecuaciones adicionales destinadas a describir de manera conceptual las dinámicas de los RV y AVR. La "Ecuación del Regulador de Velocidad" (1) se diseñará para expresar cómo el regulador responde a las variaciones entre la

velocidad requerida y la velocidad vigente del generador, influyendo así en la potencia mecánica suministrada. Simultáneamente, la "Ecuación del Regulador de Voltaje" (2) reflejará la capacidad del regulador de ajustar la excitación del generador en función de la diferencia entre el voltaje de referencia y el voltaje actual, impactando así en la estabilidad transitoria del sistema.

En el desarrollo del método de Euler Modificado, se irá más allá del enfoque estándar al introducir correcciones en cada paso del método original. Para incorporar los RV y AVR, se añadirán al modelo del generador sincrónico ecuaciones adicionales que describan de manera conceptual la dinámica de estos dispositivos de control. La "Ecuación del Regulador de Velocidad" y la "Ecuación del Regulador de Voltaje" se formularán para capturar, de manera más detallada, cómo los reguladores responden a cambios en la velocidad y el voltaje, respectivamente, influyendo en las condiciones transitorias del SEP.

En el contexto del método de Runge-Kutta de 4to orden, se introducirán ecuaciones adicionales que describirán pormenorizadamente las dinámicas de los RV y AVR en el modelo del generador sincrónico. Las "Ecuaciones de los Reguladores de Velocidad y Voltaje" se integrarán de manera coherente con las ecuaciones diferenciales originales del sistema. La "Ecuación del Regulador de Voltaje" podría conceptualizarse, por ejemplo, como un mecanismo que ajusta la excitación del generador para conservar el voltaje dentro de límites específicos durante eventos transitorios. Estas adiciones teóricas enriquecerán la representación del comportamiento dinámico del sistema en presencia de reguladores, facilitando una comprensión más minuciosa de su papel en la estabilidad transitoria.

En el proceso de implementación del Método Paso a Paso para el análisis de la estabilidad transitoria, cabe destacar que este enfoque, a diferencia de los métodos previamente mencionados, no incorpora explícitamente reguladores de velocidad y voltaje al modelo del generador sincrónico. El Método Paso a Paso se caracteriza por abordar las ecuaciones diferenciales del sistema de manera directa, sin la introducción de ecuaciones adicionales que representen la dinámica de reguladores específicos.

En este contexto, la simulación paso a paso se centra en la resolución iterativa de las ecuaciones originales del sistema, sin considerar ajustes específicos asociados a reguladores. Por ende, las variaciones en la velocidad y el voltaje se derivarán únicamente de las ecuaciones diferenciales fundamentales del generador sincrónico, sin la influencia directa de dispositivos de control adicionales.

Esta característica singular del Método Paso a Paso implica que las actualizaciones de velocidad y voltaje se realizan de manera directa en cada paso de tiempo, sin la intermediación de ecuaciones específicas de reguladores. Por lo tanto, la simulación bajo el Método Paso a Paso proporcionará un contraste significativo en términos de complejidad y comportamiento dinámico en comparación con los métodos que incorporan reguladores de velocidad y voltaje.

3.1 Pseudocódigo del método Euler

Pasos	Euler
1	<p>Carga de parámetros Cargar 'parametros_lineas_SEP.xlsx' en param_lineas</p> <hr/> <p>Definir constantes y parámetros:</p> <pre>b_start = param_lineas(:,1); b_end = param_lineas(:,2); R = param_lineas(:,3); X = param_lineas(:,4); B1 = param_lineas(:,5); g_cte = param_lineas(:,6); b_cte = param_lineas(:,7); ba_load = param_lineas(:,8); g_load = param_lineas(:,9); b_load = param_lineas(:,10);</pre>
2	<pre>i = sqrt(-1); bcc = Barra corto circuito; ext_line = extremo de la línea; num_gen = número de generadores; dt = variacion del tiempo; time = tiempo de simulacion; time_pre = tiempo de inicio falla; tdespeje = tiempo despeje falla; treconexion = tiempo en que si existe reconexion;</pre> <p>Regulador de Velocidad, 1 > Si o 0 > No reg_velo = (Depende del caso de estudio) Regulador de Voltaje, 1 > Si o 0 > No reg_volt = (Depende del caso de estudio)</p> <hr/> <p>Calcular matrices necesarias:</p> <pre>z = R + i*X; car_cte = g_cte + i*b_cte; y = 1./z; y_2 = i * B1; num_barr = max(max(b_start), max(b_end)); num_lin_traf = length(b_start); Y = zeros(num_barr, num_barr); load = g_load + i * b_load;</pre> <hr/> <p>Preparación simulación Crear matriz Y de barras (YBus) Construir Y de falla, posfalla y prefalla Reducir las matrices YB reducidas para prefalla, posfalla y falla</p>
5	<p>Inicializar variables de los reguladores para el método de Euler: km; Tm; ke; Te</p> <hr/> <p>Análisis y visualización</p> <p>Determinar la matriz Gij y Bij según la etapa de simulación</p>
6	<p>Calcular las derivadas parciales y actualizaciones en cada generador Graficar las siguientes variables:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ángulos de los generadores

3.2 Pseudocódigo del método Euler Modificado

Pasos	Euler Modificado
1	<p>Carga de parámetros Cargar 'parametros_lineas_SEP.xlsx' en param_lineas</p> <hr/> <p>Definir constantes y parámetros:</p> <pre>b_start = param_lineas(:,1); b_end = param_lineas(:,2); R = param_lineas(:,3); X = param_lineas(:,4); B1 = param_lineas(:,5); g_cte = param_lineas(:,6); b_cte = param_lineas(:,7); ba_load = param_lineas(:,8); g_load = param_lineas(:,9); b_load = param_lineas(:,10);</pre>
2	<pre>i = sqrt(-1); bcc = Barra corto circuito; ext_line = extremo de la línea; num_gen = número de generadores; dt = variacion del tiempo; time = tiempo de simulacion; time_pre = tiempo de inicio falla; tdespeje = tiempo despeje falla; treconexion = tiempo en que si existe reconexion;</pre> <p>Regulador de Velocidad, 1 > Si o 0 > No reg_velo = 1; (Depende del caso de estudio) Regulador de Voltaje, 1 > Si o 0 > No reg_volt = 1; (Depende del caso de estudio)</p> <hr/> <p>Calcular matrices necesarias:</p> <pre>z = R + i*X; car_cte = g_cte + i*b_cte; y = 1./z; y_2 = i * B1; num_barr = max(max(b_start), max(b_end)); num_lin_traf = length(b_start); Y = zeros(num_barr, num_barr); load = g_load + i * b_load;</pre> <hr/> <p>Preparación simulación Crear matriz Y de barras (YBus) Construir Y de falla, posfalla y prefalla Reducir las matrices YB reducidas para prefalla, posfalla y falla</p>
5	<p>Inicializar variables de los reguladores para el método de Euler modificado: km; Tm; ke; Te</p> <hr/> <p>Análisis y visualización</p> <p>Determinar la matriz Gij y Bij según la etapa de simulación</p>
6	<p>Calcular las derivadas parciales y actualizaciones en cada generador Graficar las siguientes variables:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ángulos de los generadores

3.3 Pseudocódigo del método Runge Kutta

Pasos	Runge Kutta
1	Carga de parámetros Cargar 'parametros_lineas_SEP.xlsx' en param_lineas
	Definir constantes y parámetros: b_start = param_lineas(:,1); b_end = param_lineas(:,2); R = param_lineas(:,3); X = param_lineas(:,4); B1 = param_lineas(:,5); g_cte = param_lineas(:,6); b_cte = param_lineas(:,7); ba_load = param_lineas(:,8); g_load = param_lineas(:,9); b_load = param_lineas(:,10);
2	i = sqrt(-1); bcc = Barra corto circuito; ext_line = extremo de la línea; num_gen = número de generadores; dt = variacion del tiempo; time = tiempo de simulacion; time_pre = tiempo de inicio falla; tdespeje = tiempo despeje falla; treconexion = tiempo en que si existe reconexion; Regulador de Velocidad, 1 > Si o 0 > No reg_velo = 1; (Depende del caso de estudio) Regulador de Voltaje, 1 > Si o 0 > No reg_volt = 1; (Depende del caso de estudio)
	Calcular matrices necesarias: z = R + i*X; car_cte = g_cte + i*b_cte; y = 1./z; y_2 = i * B1; num_barr = max(max(b_start), max(b_end)); num_lin_traf = length(b_start); Y = zeros(num_barr, num_barr); load = g_load + i * b_load;
	Preparación simulación Crear matriz Y de barras (YBus)
4	Construir Y de falla, posfalla y prefalla Reducir las matrices YB reducidas para prefalla, posfalla y falla
	Inicializar variables de los reguladores para el método de Runge Kutta: km; Tm; ke; Te
	Análisis y visualización Determinar la matriz Gij y Bij según la etapa de simulación
6	Calcular las derivadas parciales y actualizaciones en cada generador Graficar las siguientes variables: • Ángulos de los generadores

3.4 Pseudocódigo del método Paso a Paso

Pasos	Paso a Paso
1	Carga de parámetros Cargar 'parametros_lineas_SEP.xlsx' en param_lineas
	Definir constantes y parámetros: b_start = param_lineas(:,1); b_end = param_lineas(:,2); R = param_lineas(:,3); X = param_lineas(:,4); B1 = param_lineas(:,5); g_cte = param_lineas(:,6); b_cte = param_lineas(:,7); ba_load = param_lineas(:,8); g_load = param_lineas(:,9); b_load = param_lineas(:,10);
2	i = sqrt(-1); bcc = Barra corto circuito; ext_line = extremo de la línea; num_gen = numero de generadores; dt = variacion del tiempo; time = tiempo de simulacion; time_pre = tiempo de inicio falla; tdespeje = tiempo despeje falla; treconexion = tiempo en que si existe reconexion;
	Calcular matrices necesarias: z = R + i*X; car_cte = g_cte + i*b_cte; y = 1./z; y_2 = i * B1; num_barr = max(max(b_start), max(b_end)); num_lin_traf = length(b_start); Y = zeros(num_barr, num_barr); load = g_load + i * b_load;
	Preparación simulación Crear matriz Y de barras (YBus)
4	Construir Y de falla, posfalla y prefalla Reducir las matrices YB reducidas para prefalla, posfalla y falla
	Método de Paso a Paso: Determinar Pa, delta(t+1), delta_delta(t) Tiempo(t+1)=tiempo(t)+delta(t) Dt=tiempo de intervalos
	Análisis y visualización Determinar la matriz Gij y Bij según la etapa de simulación Graficar las siguientes variables: • Ángulos de los generadores

4 Metodología

La metodología aplicada consiste en dos casos de estudio en el sistema eléctrico IEEE de nueve barras, los datos del sistema se pueden apreciar en la sección 8 (Anexos) y la Figura 7.

Se desarrolla un método de control de generadores sincrónicos para analizar la estabilidad transitoria de un SEP usando métodos numéricos, modelando el sistema propuesto en el software Matlab R2022b. Para los distintos escenarios en los cuales se plantea el análisis de la estabilidad transitoria del sistema con reguladores de voltaje y velocidad y sin ellos.

El primer caso, simula una falla trifásica en la línea de transmisión 7-5 según el escenario propuesto por Anderson y Fouad [31], se desarrollará a cabo un análisis sin reguladores de velocidad y voltaje, utilizando los métodos numéricos Paso a Paso, Euler y Euler Modificado comparados con el método de Runge-Kutta de 4to orden, además se analizará el mismo caso con la utilización de RV y AVR con los métodos numéricos Euler y Euler Modificado comparados con el método de Runge-Kutta de 4to orden. El segundo caso involucra una falla en la línea 6-4 y se llevará a cabo el mismo análisis del primer caso.

Es importante señalar que el método Paso a Paso no se analizará en el escenario con RV y AVR, ya que los reguladores modificarán dinámicamente las condiciones del sistema y el método no es apto para resolver sistemas dinámicos enfocados en la estabilidad transitoria.

Este análisis integral permitirá una comparación detallada del comportamiento del sistema, contribuyendo a las estrategias de operación y al mejor entendimiento de la estabilidad operativa bajo contingencias.

CASO BASE

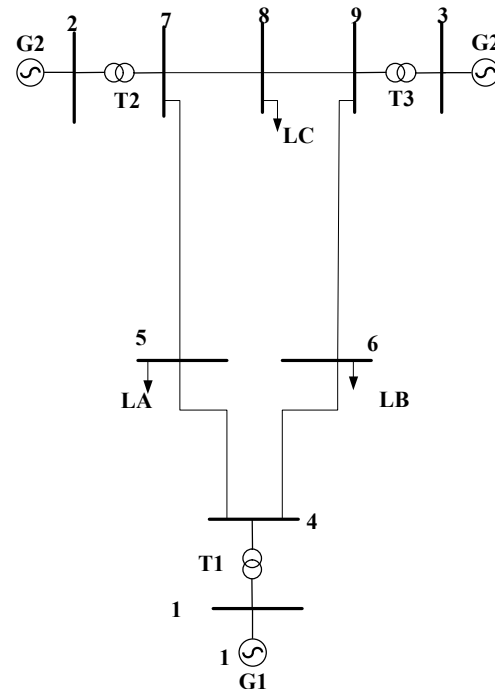


Figura 8. Sistema IEEE de 9 barras

4.1 Parámetros del sistema caso 1

Para el caso 1, se emplearán los siguientes parámetros relacionados con la falla, que se describen en la Tabla 1, los cuales han sido obtenidos del libro de Anderson y Fouad [31]. Estos valores son cruciales para simular la ocurrencia de una falla trifásica franca en la línea de transmisión 7-5 cercana a la barra 7 en el sistema IEEE de nueve barras.

Tabla 1. Parámetros de caso 1

Parámetro	Valor (s)
Tiempo de análisis	2
Tiempo de falla	0
Tiempo de despeje	0.0833
Tiempo de reconexión	0

4.2 Parámetros del sistema caso 2

Para el caso 2, se emplearán los parámetros de la tabla 2 relacionados con la falla. Estos valores serán utilizados para simular una falla trifásica en la línea de transmisión 6-4 cercana a la barra 6 en el sistema IEEE de nueve barras.

Tabla 2. Parámetros de caso 2

Parámetro	Valor (s)
Tiempo de análisis	3
Tiempo de falla	0.8
Tiempo de despeje	1
Tiempo de reconexión	0

5 Análisis de resultados

Los casos parametrizados en la sección 4.1 y 4.2 han dado como resultado dos gráficas por cada caso, las gráficas contienen la diferencia angular con respecto al generador 1 que es la barra de referencia o SLACK, y la resolución de cada método propuesto.

Además de las gráficas mencionadas, se analizará el error de los métodos numéricos tomando como referencia el método de Runge-Kutta de 4to orden.

5.1 Análisis de prueba Caso 1

Para realizar el análisis de la respuesta transitoria del SEP y observar la operación considerando la regulación de voltaje y velocidad correspondientes a los sistemas Control Automático de Generación (AGC) y Regulador Automático de Voltaje (AVR) de los generadores sincrónicos del modelo expuesto se simula una falla trifásica en la barra 7, con una duración de 83.3 milisegundos (ms), aperturando la línea 5-7, debido a la activación de sus protecciones para el despeje de la falla quedando el sistema en N-1 contingencias, ilustrada en la figura 9.

CASO 1 Línea fallada : -----

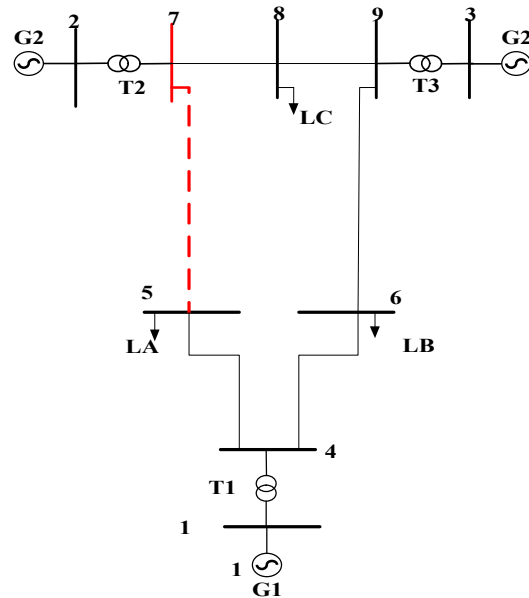


Figura 9. Falla trifásica en barra 7 apertura de línea 7-5 en modelo IEEE de 9 barras

5.1.1 Caso 1 Sin Reguladores

Las evidencias adquiridas del estudio de estabilidad angular transitorio sin reguladores se ilustran en la figura 10 en el cual se observan la diferencia angular de los generadores 2 y 3 oscilan con respecto al generador 1.

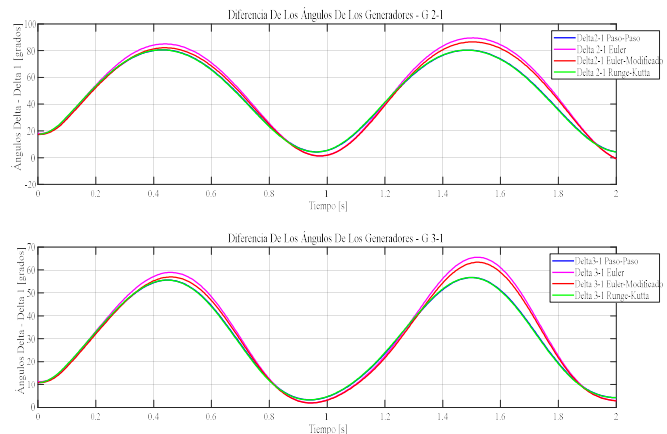


Figura 10. Diferencia Angular Sin Reguladores y diversos Métodos Numéricos

A partir de la falla cercana a la barra 7, se tiene una apertura en la línea 7-5, afectando a la topología del SEP, consecuentemente se observa que los ángulos del generador 2 y 3 oscilan dentro

de los rangos de operación, volviendo el sistema estable. En la tabla 3 se detalla los ángulos máximos de los generadores 2 y 3 con respecto al 1, los cuales afirman que el sistema entra en un estado de alerta debido a que se encuentra una línea fuera de servicio, pero sus valores siguen dentro de los límites operativos por lo cual se deduce que el sistema es confiable.

Tabla 3. Datos Caso 1 sin Reguladores $t=1.5(s)$

Métodos Numéricos	Angulo Máximo G2 1 [°]	Angulo Máximo G3 1 [°]
Runge Kutta 4to	80.27	56.7
Paso a Paso	80.31	56.8
Euler	89.55	65.26
Euler Modificado	86.54	63.07

Como se puede observar en la tabla 3, los métodos más aproximados a la resolución de la ecuación de oscilación con referencia al método Runge Kutta 4to orden son en el siguiente orden: Paso a paso, Euler modificado y por último Euler.

Debido a la velocidad de convergencia de cada uno de estos métodos existe un error con respecto al método base. Ya que el método Runge Kutta 4to orden suprime la necesidad de analizar derivadas parciales y solo usa proyecciones en puntos medios, lo cual hace que sea más preciso con respecto a los otros métodos como se ilustra en la Figura 11.

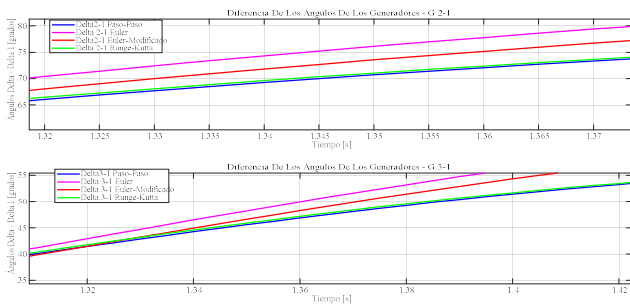


Figura 11. Zoom de Diferencia Angular Sin Reguladores y diversos Métodos Numéricos

5.1.2 Caso 1 Con Reguladores.

Las evidencias adquiridas del estudio de estabilidad angular transitorio con reguladores se ilustran en la figura 12 en el cual se observar la diferencia angular de

los generadores 2 y 3 oscilan con respecto al generador 1

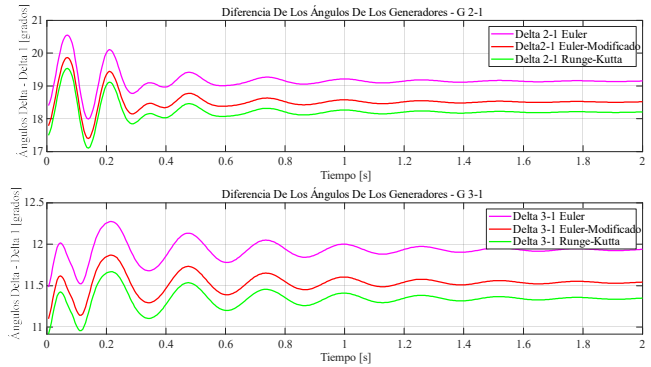


Figura 12. Diferencia Angular Con Reguladores y diversos Métodos Numéricos

A partir de la falla cercana a la barra 7, se tiene una apertura en la línea 7-5, afectando a la topología del SEP, consecuentemente se observa que los ángulos del generador 2 y 3 oscilan dentro de los rangos de operación, volviendo el sistema estable. En la tabla 4 se detalla los ángulos máximos de los generadores 2 y 3 con respecto al 1, los cuales afirman que, al aplicar reguladores ante el análisis de estabilidad, respaldan al sistema para que siga operando en condiciones dentro del rango del SEP.

Además, en la figura 12, se observa como los ángulos del generador 2 y 3 con respecto al 1, se van atenuando hasta que el sistema vuelve a un estado estacionario.

Tabla 4. Datos Caso 2 con Reguladores d(2-1) a $t=0.07(s)$ y d(3-1) a $t=0.215(s)$

Métodos Numéricos	Angulo Máximo G2-1 [°]	Angulo Máximo G3-1 [°]
Runge Kutta 4to	19.53	11.67
Euler	20.55	12.27
Euler Modificado	19.87	11.87

5.2 Análisis de prueba Caso 2.

Para realizar el análisis de la respuesta transitoria del sistema y observar la operación considerando la regulación de voltaje y velocidad correspondientes a los sistemas AGC y AVR de los generadores sincrónicos del modelo expuesto

anteriormente. Para ello se simula una falla trifásica en la barra 6, con una duración de 200 milisegundos (ms), aperturando la línea 6-4 respectivamente, debido a la activación de sus protecciones para el despeje de la falla quedando el sistema en N-1 contingencias, ilustrada en la figura 13.

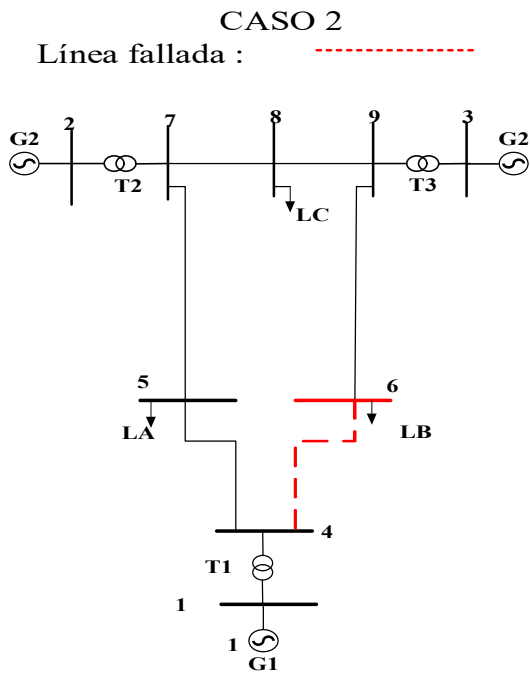


Figura 13. Falla trifásica en barra 6 apertura de la línea 6-4 en modelo IEEE de 9 barras.

5.2.1 Caso 2 Sin Reguladores.

Las evidencias adquiridas del estudio de estabilidad angular sin reguladores se ilustran en la figura 14, se observan la diferencia angular de los generadores 2 y 3 oscilan con respecto al generador 1.

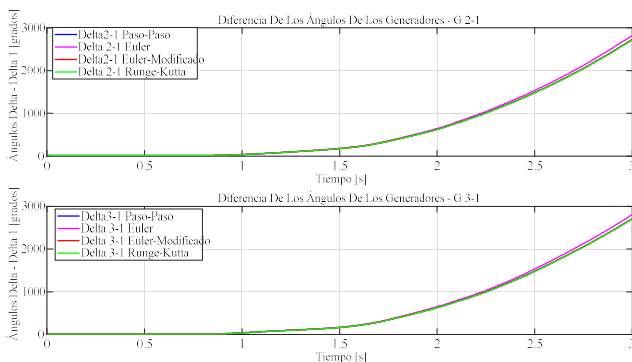


Figura 14. Diferencia Angular Sin Reguladores y Métodos Numéricos

A partir de la falla cercana a la barra 6, se tiene una apertura en la línea 6-4, debido

al tiempo de despeje la carga LB se desconecta cambiando la topología del SEP, consecuentemente se observa que los ángulos del generador 2 y 3 aumentan exponencialmente, sobrepasando los límites de operación (180°), volviendo el sistema inestable. En la tabla 5 se detalla los ángulos y máximos de los generadores 2 y 3, los cuales afirman que el sistema colapsa al cabo de un segundo, el cual es el tiempo de despeje.

Tabla 5. Datos Caso 2 sin Reguladores $t=1.5(s)$

Métodos Numéricos	Angulo Máximo G2-1 [°]	Angulo Máximo G3-1 [°]
Runge Kutta 4to	176.3	166
Paso a Paso	177.3	167
Euler	183.9	172.1
Euler Modificado	177.7	166.3

Como se puede observar en la tabla 5, los métodos más aproximados a la resolución de la ecuación de oscilación con referencia al método Runge Kutta 4to orden son en el siguiente orden: Paso a paso, Euler modificado y por último Euler.

Debido a la velocidad de convergencia de cada uno de estos métodos existe un error con respecto al método base. Ya que el método Runge Kutta 4to orden suprime la necesidad de analizar derivadas parciales y solo usa proyecciones en puntos medios, lo cual hace que sea más preciso con respecto a los otros métodos como se ilustra en la Figura 15.

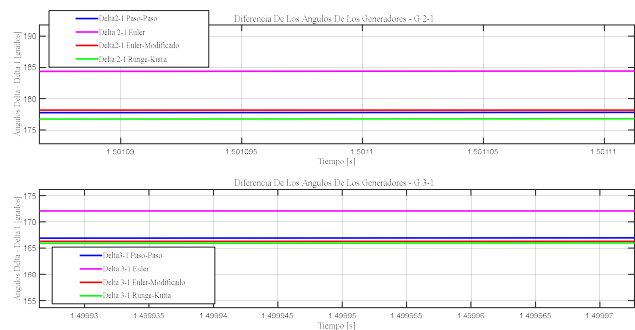


Figura 15. Zoom de Diferencia Angular Sin Reguladores y Métodos Numéricos

5.2.2 Caso 2 Con Reguladores

Las evidencias adquiridas del estudio de estabilidad angular con reguladores se ilustran en la figura 16 en el cual se observa la diferencia angular de los generadores 2 y 3 oscilan con respecto al generador 1

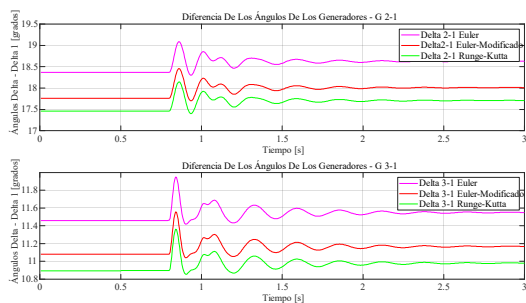


Figura 16. Diferencia Angular Con Reguladores y Métodos Numéricos

A partir de la falla cercana a la barra 6, se tiene una apertura en la línea 6-4, afectando a la topología del SEP, consecuentemente se observa que los ángulos del generador 2 y 3 oscilan dentro de los rangos de operatividad, volviendo el sistema estable. En la tabla 6 se detalla los ángulos máximos de los generadores 2 y 3 con respecto al 1, los cuales afirman que, al aplicar reguladores ante el análisis de estabilidad, respaldan al sistema para que siga operando en condiciones dentro del rango del SEP.

Además, en la figura 16, se observa como los ángulos del generador 2 y 3 con respecto al 1, están operando de manera normal, transcurrida la falla actúan los reguladores, por lo cual los ángulos se van atenuando hasta que el sistema vuelve a un estado estacionario en un tiempo de 2 segundos.

Tabla 6. Datos Caso 2 con Reguladores d(2-1) a $t=0.865(s)$ y d(3-1) a $t=0.845(s)$

Métodos Numéricos	Angulo Máximo G2-1 [°]	Angulo Máximo G3-1 [°]
Runge Kutta 4to	18.14	11.36
Euler	19.08	11.95
Euler Modificado	18.45	11.55

6 Conclusiones

Al analizar la respuesta transitoria en una sistema eléctrico de potencia planteado una metodología en la cual se considera casos de estudio con y sin reguladores de voltaje y velocidad y utilizando diferentes métodos numéricos para resolver la metodología planteada, es importante destacar la metodología utilizada es que compara la efectividad de cada método numérico utilizado, identificando el método numérico más eficiente para el análisis de estabilidad transitoria, siendo este el método de Runge-Kutta de 4to orden, ya que puede analizar los casos de estudio con y sin reguladores de velocidad y voltaje.

Mediante los casos planteados se pudo identificar los factores adversos que modifican negativamente la estabilidad transitoria como: el tiempo de despeje de falla, desconexión súbita de carga y la parametrización óptima para el correcto funcionamiento del sistema AVR y AGC, tal que los generadores sincrónicos actúen de manera adecuada para que se mantengan en los límites operacionales evitando la inestabilidad del sistema y haciéndolo más confiable.

Con cada uno de los métodos numéricos utilizados los cuales son: Paso a Paso, Euler, Euler Modificado y Runge-Kutta 4to orden. Se pudo evidenciar que los métodos numéricos empleados para resolver la ecuación de oscilación, apreciando que el método Runge Kutta de cuarto de orden destaca por su rápida convergencia al reducir el número de iteraciones, aunque esto implica una mayor complejidad matemática por el modelamiento a comparación de los métodos Paso a Paso, Euler y Euler Modificado.

6.1 Trabajos futuros

Los resultados adquiridos en base a este documento pueden ser incentivados para

desarrollar investigaciones a futuro tal como:

- Implementación de un margen de confiabilidad del sistema en función del tiempo en base al análisis de estabilidad.
- Optimización de potencia reactiva para garantizar que tanta reserva se establece para aplicar AVR en los generadores.

7 Referencias

- [1] F. Ruiz-Tipan, C. Barrera-Singana, and A. Valenzuela, "Reactive power compensation using power flow sensitivity analysis and QV curves," *2020 Ieee Andescon, Andescon 2020*, 2020, doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272113.
- [2] F. Ruiz-Tipan and C. Barrera, "Determinación de la compensación reactiva en paralelo en sistemas de transmisión usando resultados de sensibilidad y curvas QV," 2020.
- [3] U. Al-Mulali, H. G. Fereidouni, and J. Y. M. Lee, "Electricity consumption from renewable and non-renewable sources and economic growth: Evidence from Latin American countries," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 290–298, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.10.006.
- [4] J. Shair, H. Li, J. Hu, and X. Xie, "Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 145, no. December 2020, p. 111111, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111111.
- [5] K. N. Hasan, R. Preece, and J. V. Milanović, "Existing approaches and trends in uncertainty modelling and probabilistic stability analysis of power systems with renewable generation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 101, no. December 2017, pp. 168–180, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.10.027.
- [6] M. Amroune, "Machine Learning Techniques Applied to On-Line Voltage Stability Assessment: A Review," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 28, no. 2, pp. 273–287, 2021, doi: 10.1007/s11831-019-09368-2.
- [7] F. Ruiz-Tipán and A. Valenzuela, "Despacho económico en centrales de generación térmicas considerando restricciones económicas y ambientales para la operación en isla de una red eléctrica industrial," *Brazilian Appl. Sci. Rev.*, pp. 851–871, 2022, doi: 10.34115/basrv6n3-002.
- [8] F. Ruiz-Tipán and A. Valenzuela, "Literary review of economic environmental dispatch considering bibliometric analysis," *Iteckne*, 2021, doi: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v19i1.2631>.
- [9] M. Paolone *et al.*, "Fundamentals of power systems modelling in the presence of converter-interfaced generation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 189, no. April, p. 106811, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106811.
- [10] J. Gong, D. Li, T. Wang, W. Pan, and X. Ding, "A comprehensive review of improving power quality using active power filters," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 199, no. May, p. 107389, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107389.
- [11] K. S. Ratnam, K. Palanisamy, and G. Yang, "Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 124, no. February, p. 109773, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109773.

- [12] K. M. Cheema, "A comprehensive review of virtual synchronous generator," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 120, no. March, p. 106006, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106006.
- [13] V. Mallemaci, F. Mandrile, S. Rubino, A. Mazza, E. Carpaneto, and R. Bojoi, "A comprehensive comparison of Virtual Synchronous Generators with focus on virtual inertia and frequency regulation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 201, no. September, p. 107516, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107516.
- [14] M. Saadatmand, G. Gharehpetian, I. Kamwa, P. Siano, and J. Guerrero, "A Survey on FOPID Controllers for LFO Damping in Power Systems Using Synchronous Generators, FACTS Devices and Inverter-Based," 2021.
- [15] D. A. ANTAMBA ÁVILA, "Estabilidad angular de un sistema eléctrico de potencia considerando la integración de reguladores de velocidad y voltaje," *Univ. Politécnica Sales. Sede Quito*, vol. 1, p. 33, 2018, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16461/1/UPS-ST003824.pdf>
- [16] A. R. Sobbouhi and A. Vahedi, "Transient stability prediction of power system; a review on methods, classification and considerations," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 190, no. July 2020, p. 106853, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106853.
- [17] X. He, H. Geng, and G. Mu, "Modeling of wind turbine generators for power system stability studies: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 143, no. May 2020, p. 110865, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110865.
- [18] S. Vadi, S. Padmanaban, R. Bayindir, F. Blaabjerg, and L. Mihet-Popa, "A review on optimization and control methods used to provide transient stability in microgrids," *Energies*, vol. 12, no. 18, pp. 1–20, 2019, doi: 10.3390/en12183582.
- [19] J. Segundo-Ramirez, A. Bayo-Salas, M. Esparza, J. Beerten, and P. Gomez, "Frequency Domain Methods for Accuracy Assessment of Wideband Models in Electromagnetic Transient Stability Studies," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 35, no. 1, pp. 71–83, 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2927171.
- [20] M. Ali Shaik, P. L. Mareddy, and N. Visali, "Enhancement of Voltage Profile in the Distribution system by Reconfiguring with DG placement using Equilibrium Optimizer: Enhancement of voltage profile in the distribution system," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 5, pp. 4081–4093, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.09.063.
- [21] Aliyu Sabo, Noor Izzri, and Abdul Wahab, "Rotor Angle Transient Stability Methodologies of Power Systems: A Comparison," *2019 IEEE Student Conf. Res. Dev.*, vol. SCORreD, pp. 1–6, 192AD.
- [22] O. D. Montoya, W. Gil-González, and A. Garces, "Numerical methods for power flow analysis in DC networks: State of the art, methods and challenges," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 123, no. 40, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106299.
- [23] V. K. Verma and S. Mondal, "A brief review of numerical methods for heat and mass transfer of Casson fluids," *Partial Differ. Equations Appl. Math.*, vol. 3, no. December 2020, p. 100034, 2021, doi: 10.1016/j.padiff.2021.100034.
- [24] K. Niu, P. Li, Z. Huang, L. J. Jiang, and H. Bagci, "Numerical Methods

- for Electromagnetic Modeling of Graphene: A Review,” *IEEE J. Multiscale Multiphysics Comput. Tech.*, vol. 5, pp. 44–58, 2020, doi: 10.1109/JMMCT.2020.2983336.
- [25] B. Bilgin *et al.*, “Modeling and Analysis of Electric Motors: State-of-the-Art Review,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 5, no. 3, pp. 602–617, 2019, doi: 10.1109/TTE.2019.2931123.
- [26] B. K. Kreiger and W. V. Srubar, “Moisture buffering in buildings: A review of experimental and numerical methods,” *Energy Build.*, vol. 202, p. 109394, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109394.
- [27] Edward Wilson Kimbark, E. Guanabara, and K. Ltda, *Power-System-Stability*, 1st ed. 1995.
- [28] A. Kumar, A. Ansari, and M. Hashmi, “A REVIEW ON NUMERICAL AND WAVELET METHOD BASED ALGORITHM FOR THE SOLUTION OF COMPUTATIONAL PROBLEM IN THE AREA OF ELECTROMAGNETICS,” vol. 21, no. 12, pp. 7189–7199, 2022.
- [29] Q. H. Wu, Y. Lin, C. Hong, Y. Su, T. Wen, and Y. Liu, “Transient Stability Analysis of Large-scale Power Systems: A Survey,” *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 1284–1300, 2023, doi: 10.17775/CSEEJPES.2022.07110.
- [30] R. Mahnken, “Derivation of third order Runge–Kutta methods (ELDIRK) by embedding of lower order implicit time integration schemes for local and global error estimation,” *Comput. Mech.*, 2023, doi: 10.1007/s00466-023-02347-2.
- [31] P.M. Anderson and A.A. Fouad, *Power system control and stability*, vol. 67, no. 8. 2008. doi: 10.1109/proc.1979.11425.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 7: Matriz de estado del arte.

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE GENERADORES SINCRÓNICOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE UN SISTEMA DE POTENCIA USANDO MÉTODOS NUMÉRICOS.																								
ITEM	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Análisis transitorio	Estabilidad multimáquina	Análisis de Fallas	Control de generadores	Métodos numéricos para resolver ecuación - oscilación	Análisis de fallas	Resolución ecuación- oscilación con métodos numéricos	Estabilidad angular	Análisis de estabilidad en un SEP	Control de generadores	Análisis armónicos	Análisis del flujo de potencia	Estabilidad angular	Control de generadores	Modelación del sistema	Programación dinámica (DP)	Algoritmos genéricos	Sistema multimáquina	Mejorar la estabilidad	Control de generadores sincrónicos	Estabilidad transitoria
1	2020	Reactive power compensation using power flow sensitivity analysis and QV curves	8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	2014	Electricity consumption from renewable and non-renewable sources and economic growth: Evidence from Latin American countries,	320	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	2021	Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics,	149	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	2019	Existing approaches and trends in uncertainty modelling and probabilistic stability analysis of power systems with renewable generation,	149	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	2021	Machine Learning Techniques Applied to On-Line Voltage Stability Assessment: A Review,	30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	2022	Despacho económico en centrales de generación térmicas considerando restricciones económicas y ambientales para la operación en isla de una red eléctrica industrial,	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	2022	Literary review of economic environmental dispatch considering bibliometric analysis,	6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	2020	Fundamentals of power systems modelling in the presence of converter-interfaced generation	178	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	2021	A comprehensive review of improving power quality using active power filters	108	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE GENERADORES SINCRÓNICOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE UN SISTEMA DE POTENCIA USANDO MÉTODOS NUMÉRICOS.

ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA						
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Análisis transitorio	Estabilidad multimáquina	Análisis de Fallas	Control de generadores	Métodos numéricos para resolver ecuación - oscilación	Análisis de fallas	Resolución ecuación- oscilación con métodos numéricos	Estabilidad angular	Análisis de estabilidad en un SEP	Control de generadores	Análisis armónicos	Análisis del flujo de potencia	Estabilidad angular	Control de generadores	Modelación del sistema	Programación dinámica (DP)	Algoritmos genéticos	Sistema multimáquina	Mejorar la estabilidad	Control de generadores sincrónicos	Estabilidad transitoria
10	2020	Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions - A review,	289	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	2020	A comprehensive review of virtual synchronous generator	167	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	2021	A comprehensive comparison of Virtual Synchronous Generators with focus on virtual inertia and frequency regulation,	54	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	2021	A Survey on FOPID Controllers for LFO Damping in Power Systems Using Synchronous Generators, FACTS Devices and Inverter-Based,	16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	2021	Transient stability prediction of power system; a review on methods, classification and considerations	52	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	2021	Modeling of wind turbine generators for power system stability studies: A review	40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	2019	A review on optimization and control methods used to provide transient stability in microgrids,	49	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	2019	Frequency Domain Methods for Accuracy Assessment of Wideband Models in Electromagnetic Transient Stability Studies	26	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE GENERADORES SINCRÓNICOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE UN SISTEMA DE POTENCIA USANDO MÉTODOS NUMÉRICOS.

ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Análisis transitorio	Estabilidad multimáquina	Análisis de Fallas	Control de generadores	Métodos numéricos para resolver ecuación - oscilación	Análisis de fallas	Resolución ecuación-oscilación con métodos numéricos	Estabilidad angular	Análisis de estabilidad en un SEP	Control de generadores	Análisis armónicos	Análisis del flujo de potencia	Estabilidad angular	Control de generadores	Modelación del sistema	Programación dinámica (DP)	Algoritmos genéricos	Sistema multimáquina	Mejorar la estabilidad	Control de generadores sincrónicos	Estabilidad transitoria
20	2020	Numerical methods for power flow analysis in DC networks: State of the art, methods and challenges.	39	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	2021	A brief review of numerical methods for heat and mass transfer of Casson fluids.	25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	2020	Numerical Methods for Electromagnetic Modeling of Graphene: A Review.	21	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23	2019	Modeling and Analysis of Electric Motors: State-of-the-Art Review.	95	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	2019	Moisture buffering in buildings: A review of experimental and numerical methods.	56	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	2018	Estabilidad angular de un sistema eléctrico de potencia considerando la integración de reguladores de velocidad y voltaje.	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	2023	Derivation of third order Runge-Kutta methods (ELDIRK) by embedding of lower order implicit time integration schemes for local and global error estimation.	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CANTIDAD:				3	6	11	6	3	1	10	6	7	7	7	7	7	6	9	7	14	5	8	6	8

7.2 Resumen de Indicadores

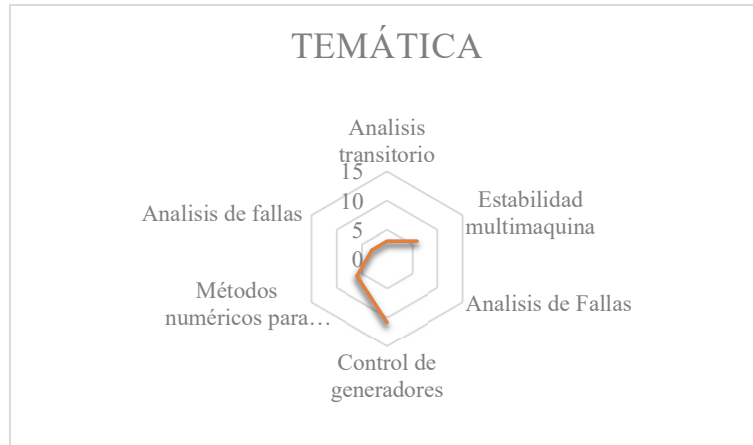


Figura 17. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

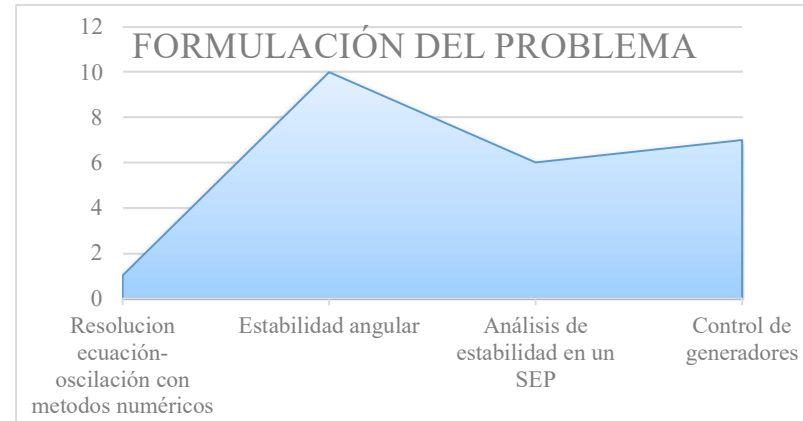


Figura 18. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

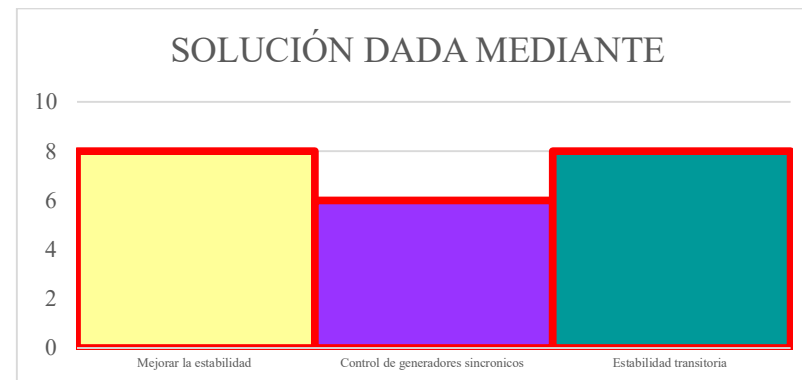


Figura 19. Indicador de solución - Estado del arte.

8 Anexos

Tabla 1. Datos de líneas del sistema IEEE de 9 barras

Línea	De Barra	A Barra	R (Ohmios)	X (Ohmios)	B (Ohmios)
1-2	1	2	0.02	0.06	0.04
2-3	2	3	0.08	0.24	0.16
3-4	3	4	0.06	0.18	0.12
4-5	4	5	0.02	0.06	0.04
4-6	4	6	0.06	0.18	0.12
6-7	6	7	0.09	0.27	0.18
6-8	6	8	0.04	0.12	0.08
6-9	6	9	0.09	0.27	0.18

Tabla 2. Datos de transformadores del sistema IEEE de 9 barras

Transformador	De Barra	A Barra	Relación de Transformación	Z (Ohmios)
7-8	7	8	1:1	0.05 + j0.2

Tabla 3. Datos de generadores del sistema IEEE de 9 barras

Generador	Barra	S (MVA)	V (kV)	Xd (Ohmios)	Xd' (Ohmios)	H (segundos)
G1	1	100	13.8	1.81	0.3	5
G2	2	100	18	1.76	0.3	5
G3	3	100	13.2	1.89	0.3	5

Tabla 4. Datos de cargas del sistema IEEE de 9 barras

Barra	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	90	30
6	0	0
7	100	35
8	0	0
9	125	50