

**ESTABILIDAD ANGULAR DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA  
CONSIDERANDO LA INTEGRACIÓN DE REGULADORES DE VELOCIDAD  
Y VOLTAJE**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
ESTABILIDAD ANGULAR DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA  
CONSIDERANDO LA INTEGRACIÓN DE REGULADORES DE VELOCIDAD  
Y VOLTAJE**

**AUTOR:  
DANIELA ANABEL ANTAMBA ÁVILA**

**DIRECTOR:  
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

**Quito, Noviembre 2018**

Daniela Anabel Antamba Ávila

**ESTABILIDAD ANGULAR DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA  
CONSIDERANDO LA INTEGRACIÓN DE REGULADORES DE VELOCIDAD  
Y VOLTAJE**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2018

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Daniela Anabel Antamba Ávila** (Y'1995 – M'08). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio “República del Ecuador” de la ciudad de Otavalo. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el estudio de estabilidad angular en Sistemas Eléctricos de Potencia. [dantamba@est.ups.edu.ec](mailto:dantamba@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



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

Todos los derechos reservados:

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

**DERECHOS RESERVADOS**

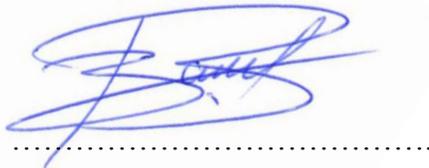
©2018 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*ESTABILIDAD ANGULAR DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA CONSIDERANDO LA INTEGRACIÓN DE REGULADORES DE VELOCIDAD Y VOLTAJE*” realizado por Daniela Anabel Antamba Ávila, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Noviembre de 2018



.....  
Carlos Andrés Barrera Singaña

C.C.: 0503503336

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Daniela Anabel Antamba Ávila, con documento de identificación N° 1003686357, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de grado/titulación intitulado: “*ESTABILIDAD ANGULAR DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA CONSIDERANDO LA INTEGRACIÓN DE REGULADORES DE VELOCIDAD Y VOLTAJE*”, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., Noviembre de 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Daniela Antamba', with a decorative flourish underneath.

.....  
Daniela Anabel Antamba Ávila

C.C.: 1003686357

## 1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción .....	2
2	Marco teórico .....	4
2.1	Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia .....	4
2.2	Estabilidad Angular.....	4
2.2.1	Relación entre estabilidad angular y estabilidad transitoria.....	4
2.3	Modelos del sistema eléctrico de potencia para estudios de estabilidad angular....	5
2.3.1	Generadores sincrónicos .....	5
2.3.2	Transformadores .....	6
2.3.3	Líneas de transmisión.....	7
2.4	Reguladores de velocidad .....	7
2.5	Reguladores de voltaje .....	7
3	Métodos de solución de la ecuación de oscilación.....	8
3.1	Método Runge-Kutta 4to orden .....	8
3.2	Modelación matemática .....	9
3.3	Modelación de los sistemas reguladores .....	10
4	Implementación del modelo matemático .....	11
4.1	Sistema propuesto para estudio de estabilidad.....	12
4.2	Modelo para estudio de estabilidad.....	12
5	Análisis de resultados.....	13
6	Conclusiones .....	16
6.1	Trabajos futuros .....	17
7	Referencias .....	17
7.1	Matriz de Estado del Arte .....	20
7.2	Resumen de Indicadores .....	22
8	Anexos .....	24

## 2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estudio de estabilidad angular en un SEP. ....	3
Figura 2. Sistema estable de un grupo de generadores [9].....	4
Figura 3. Sistema inestable de un grupo de generadores [9].....	4
Figura 4. Circuito equivalente de un generador sincrónico – Modelo clásico [6].....	5
Figura 5. Transformador de 2 devanados con tap [20]. ....	6
Figura 6. Modelo $\pi$ del transformador [20].....	7
Figura 7. Modelo $\pi$ de líneas de transmisión. ....	7
Figura 8. Reguladores de velocidad y voltaje según IEEE [24]. ....	8
Figura 9. Método de Runge-Kutta 4to Orden. ....	9
Figura 10. Modelo clásico de generador sincrónico para estudios de estabilidad. ....	10
Figura 11. Modelación para un regulador de velocidad básico [24].....	11
Figura 12. Modelación para un regulador de voltaje básico [24]. ....	11
Figura 13. Sistema IEEE de 9 barras [13].....	12
Figura 14. Ángulos de los rotores de los generadores. Sin Reguladores. ....	13
Figura 15. Diferencia angular. Sin Reguladores. ....	13
Figura 16. Ángulos de los rotores de los generadores. Reguladores de Voltaje.....	14
Figura 17. Diferencia angular. Reguladores de Voltaje.....	14
Figura 18. Voltaje interno generado en los generadores con reguladores de voltaje.....	14
Figura 19. Ángulos de los rotores de los generadores. Reguladores de Velocidad. ....	15
Figura 20. Diferencia angular. Reguladores de Velocidad. ....	15
Figura 21. Potencias Mecánicas de los generadores con reguladores de Velocidad. ....	15
Figura 22. Ángulos de los rotores de los generadores. Reguladores de Velocidad y Voltaje.....	15
Figura 23. Diferencia angular. Reguladores de Velocidad y Voltaje. ....	16
Figura 24. Voltaje interno generado en los generadores. Reguladores de Voltaje y Velocidad. ....	16
Figura 25. Potencias Mecánicas de los generadores. Reguladores de Velocidad y Voltaje.....	16
Figura 26. Resumen e Indicador de la Temática - Estado del Arte.....	22
Figura 27. Indicador de la formulación del problema – Estado del Arte.....	22
Figura 28. Indicador de solución – Estado del Arte.....	23

### **3. ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Matriz de Estado del Arte .....	20
Tabla 2. Parámetros de las Líneas y Cargas del Sistema IEEE de 9 Barras. ....	24
Tabla 3. Parámetros de los Generadores del Sistema IEEE de 9 Barras.....	24

# ESTABILIDAD ANGULAR DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA CONSIDERANDO LA INTEGRACIÓN DE REGULADORES DE VELOCIDAD Y VOLTAJE

## Resumen

La estabilidad angular es de gran importancia en los Sistemas de Potencia ya que su estudio y entendimiento permiten mantener en condiciones normales de operación "sincronismo" a las máquinas del sistema luego de verse afectado por una perturbación. En este trabajo se presenta un desarrollo el cual permite observar el comportamiento de un sistema de potencia sometido a una perturbación en el período transitorio, incluyendo en los generadores reguladores de velocidad y voltaje. El método numérico que permite resolver el sistema de ecuaciones de oscilación de un sistema multimáquina es el de Runge-Kutta de cuarto orden, obteniendo una estimación del comportamiento angular de las máquinas sincrónicas con respecto al tiempo.

**Palabras Clave:** Estabilidad Angular, Regulación de Voltaje, Regulación de Velocidad, Runge-Kutta.

## Abstract

Angle stability has a highly importance in Power Systems as their study and comprehension allows to maintain in normal conditions of working "synchronism" to the machines of the system after being affected by a disturbance. In this paper is presented a development that allows to observe the behavior of a power system undergone a disturbance in transient period of time, including the generators, speed and voltage regulators. The numerical method that permit to solve the oscillation equations it is from a multi-machine system named fourth order Runge-Kutta, getting an appraisal of the angular behavior from the synchronous machines with about to the time.

**Keywords:** Angular stability, Voltage regulator, Speed regulator, Runge-Kutta.

# 1 Introducción

La estabilidad es uno de los casos más importantes de estudio cuando se refiere a los sistemas eléctricos de potencia (SEP), ya que permite estudiar el comportamiento del mismo ante una perturbación física, garantizando su operación en condiciones normales, confiabilidad, calidad y seguridad [1].

Los sistemas eléctricos de potencia son vulnerables debido a la naturaleza del evento de la falla, el lapso de tiempo que dure la perturbación, provocando inestabilidad en el sistema [2][3].

Al referirse a máquinas sincrónicas interconectadas entre si se debe tener presente que pueden perder su estabilidad debido al: tipo de falla, localización y tiempo de despeje. Si la duración de la perturbación del sistema es alta, mayor es la desviación de la frecuencia y ángulo del rotor, implicando inestabilidad [4][5].

La estabilidad angular está relacionada con el comportamiento de los ángulos de los rotores ante una perturbación sea de gran o pequeña magnitud [6]. Durante la perturbación, el ángulo de rotor del generador comienza a oscilar, si la falla no es tan severa el sistema llega a estabilizarse hasta que el ángulo del rotor regrese a su estado original o un nuevo estado estable, mientras que, si la falla es demasiado grande el ángulo del rotor oscila sin amortiguación, lo que conlleva a la inestabilidad del sistema [7].

Partiendo del estudio de estabilidad se puede determinar algunas acciones correctivas, entre las cuales se tiene: el tiempo crítico de liberación de falla, el diseño de esquemas para pérdida de carga y el diseño de esquemas de disparo transferido [8].

Cuando un generador pierde el sincronismo gira a una velocidad distinta

con respecto al sistema, por consecuencia los rotores de las máquinas comienzan a oscilar produciendo cambios en la aceleración de los generadores [9].

Para el estudio de la estabilidad se considera un generador sincrónico, el cual está ligado a conceptos mecánicos, matemáticos y físicos. En donde, si se pretende garantizar dicha estabilidad se debe relacionar a los generadores con las ecuaciones de oscilación, que se producen por una perturbación transitoria en el SEP.

Existen varios métodos de integración para resolver la ecuación de oscilación como se puede encontrar en [10]. En donde al ser métodos complejos y de alta precisión es indispensable el uso de paquetes computacionales.

Los métodos de integración determinan el comportamiento del ángulo con respecto al tiempo, obteniendo las curvas de oscilación de los generadores.

El método de integración escogido para el análisis de estabilidad es el método de Runge-Kutta de 4<sup>to</sup> orden ya que presenta una mejor respuesta y mayor precisión al momento de obtener las curvas de los ángulos de los rotores [11][12].

El presente documento propone un método para analizar la estabilidad angular, mediante la integración de reguladores de velocidad y voltaje, con el detalle que se puede presentar el desempeño de cada uno de los generadores del sistema y sus características de mayor importancia para el estudio que son: ángulo del rotor, voltaje interno generado y las potencias mecánica y eléctrica, lo cual permite apreciar gráficamente si el generador llega a perder el sincronismo con los demás generadores del sistema.

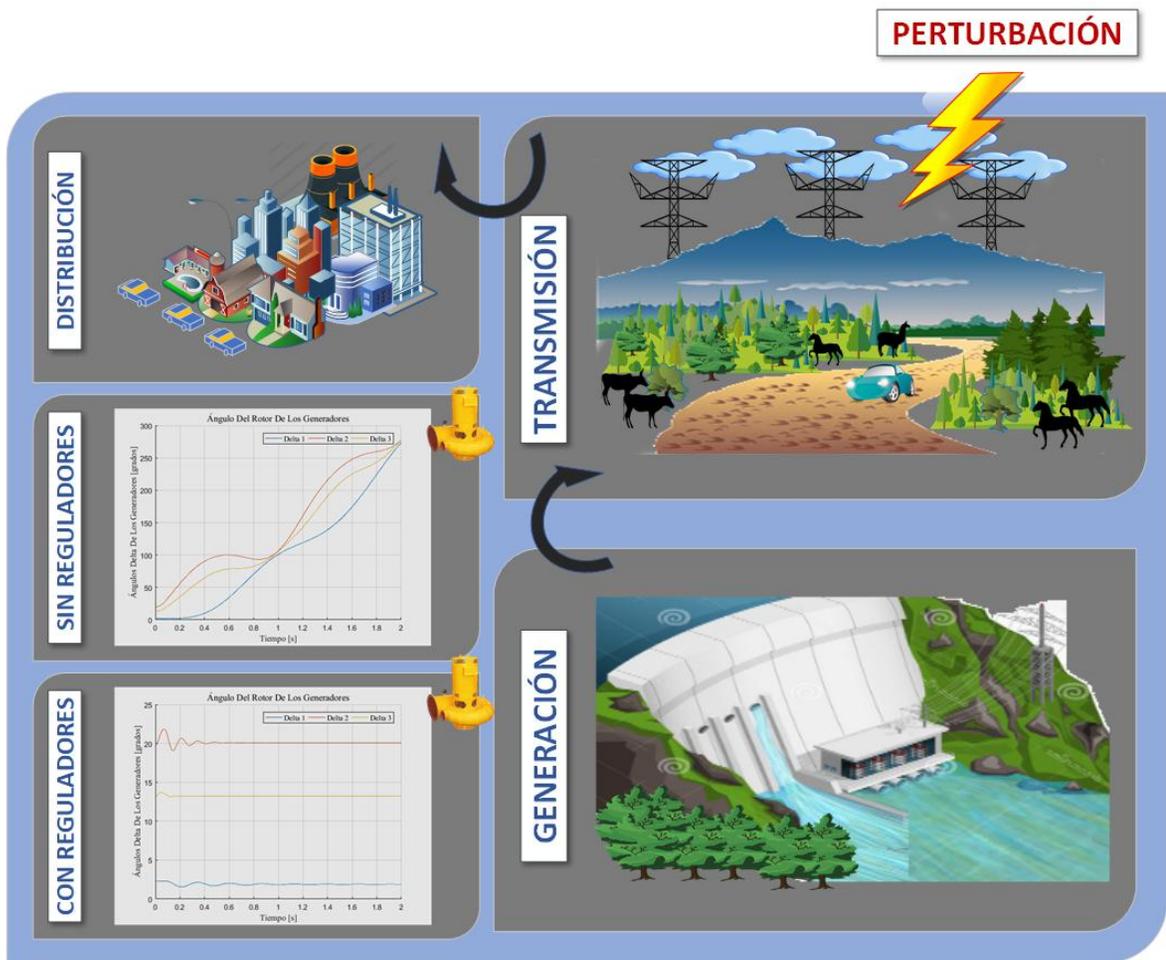


Figura 1. Estudio de estabilidad angular en un SEP.

En la presente investigación se realiza el análisis de estudio, tomando como referencia el sistema de 9 barras propuesto por la IEEE [13]. En la Figura 1 se indica de manera gráfica las distintas temáticas asociadas a un estudio de estabilidad angular, indicando que las fallas se producen en el sistema de transmisión.

La estructura del presente documento se encuentra dividido de la siguiente manera: Sección I: Se muestra la Introducción y antecedentes relacionados al estudio de estabilidad angular. Sección II: Se presenta el marco teórico relacionado al concepto de estabilidad en el SEP y estabilidad angular. Sección III:

Modelado matemático del método de Runge-Kutta y los reguladores de velocidad y voltaje. Sección IV: Implementación del modelo matemático. Sección V: Se indica el análisis de resultados, en base a la metodología propuesta. Sección VI: Se realiza las conclusiones y trabajos futuros que se pueden llevar a cabo. Y finalmente en la Sección VII: Se muestra las referencias y anexos.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia

El Sistema de Potencia se encuentra en cambios constantes, por ello es necesario garantizar niveles óptimos de voltaje, potencias activas, potencias reactivas, frecuencia de operación y ángulos de rotores de las máquinas. En donde a pesar de sufrir una perturbación, esta no debe implicar ningún cambio [10].

En los SEP se considera tres factores que afectan la estabilidad del sistema. La estabilidad de voltaje que se refiere en conservar niveles óptimos de voltaje garantizando la operación del SEP, la estabilidad de frecuencia que trata de mantener un balance entre generación-carga y la estabilidad angular tiene como finalidad mantener en sincronismo los generadores [3].

### 2.2 Estabilidad Angular

Es la capacidad que los generadores sincrónicos tienen para retomar condiciones normales de operación después de ser sujetos a una perturbación leve o severa, donde la máquina sincrónica tiene la facilidad de mantener o restaurar el equilibrio entre la potencia eléctrica y la potencia mecánica. Si este equilibrio no se lograra el sistema entra en inestabilidad produciendo un aumento de oscilaciones angulares llevando a la pérdida de sincronismo [6][14].

En la Figura 2 se puede observar un sistema en estado estable luego de una perturbación. El comportamiento de los generadores es oscilatorio en donde los ángulos no proyectan una separación demasiado grande.

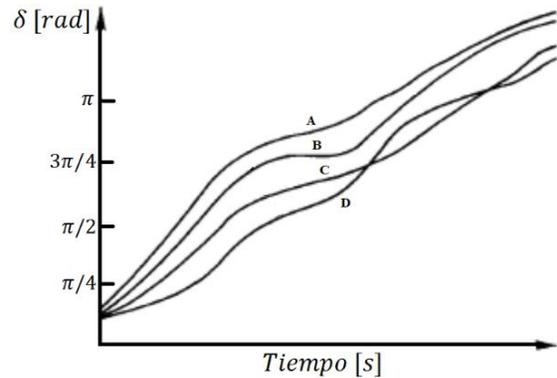


Figura 2. Sistema estable de un grupo de generadores [9].

Mientras tanto en la Figura 3 se puede observar el mismo sistema de generadores, pero los ángulos proyectan una separación considerable, indicando que el sistema se encuentra en inestabilidad, perdiendo sincronismo [9][15].

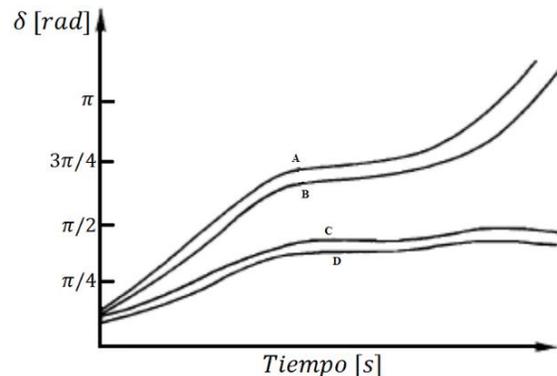


Figura 3. Sistema inestable de un grupo de generadores [9].

#### 2.2.1 Relación entre estabilidad angular y estabilidad transitoria

Cuando existen grandes perturbaciones en el SEP, se utiliza la estabilidad transitoria. En donde, el tiempo para el estudio de estabilidad es de 3 a 5 segundos después de ocurrida la falla y puede extenderse hasta los 10 segundos según la severidad y la probabilidad de ocurrencia de la perturbación, en donde

por lo general, la respuesta del sistema se encuentra principalmente en los ángulos de potencia de los generadores del sistema [3][10][16].

## 2.3 Modelos del sistema eléctrico de potencia para estudios de estabilidad angular

### 2.3.1 Generadores sincrónicos

Constituyen una de las fuentes principales de energía eléctrica para los SEP. Donde se convierte la energía mecánica en energía eléctrica abasteciendo grandes cargas, siendo a su vez un punto muy importante en la estabilidad.

Las máquinas sincrónicas poseen dos elementos esenciales. Uno de ellos es el devanado de campo, que transporta la corriente continua y produce un campo magnético y el otro es el devanado de armadura, el cual toma estos campos magnéticos induciendo voltajes alternos, en los devanados correctamente distribuidos a  $120^\circ$  de separación de manera que, se tiene una rotación uniforme del campo magnético.

Para la producción de un torque estable, los campos del rotor y el estator deben girar a la misma velocidad “velocidad sincrónica”. Donde el número de polos de campo, se encuentra expresado por medio de la velocidad mecánica del rotor y la frecuencia eléctrica del estator [10].

$$n_m = \frac{f_e * 120}{P} \quad (1)$$

Donde:

$n_m$	Velocidad en [rev/min]
$f_e$	Frecuencia en [Hz]
$P$	Número de polos.

Existen dos tipos de rotor, los cuales dependen de la velocidad. Para una baja velocidad se utiliza el rotor de polos salientes, ya que manejan un mayor número de polos como son las turbinas hidráulicas y para las que operan a altas velocidades se utiliza el rotor cilíndrico, que manejan un menor número de polos como son las turbinas a gas y a vapor.

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

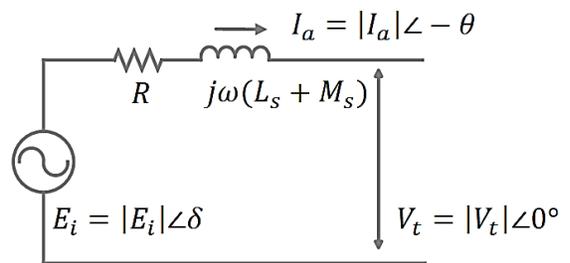


Figura 4. Circuito equivalente de un generador sincrónico – Modelo clásico [6].

Donde:

$E_i$	Voltaje interno generado.
$R_a I_a$	Caída de voltaje en la resistencia de armadura.
$j\omega L_s I_a$	Caída de voltaje en la reactancia propia de armadura.
$j\omega M_s I_a$	Caída de voltaje en la reactancia mutua de armadura.
$V_t$	Voltaje de fase del generador.

En la Figura 4 se indica el circuito equivalente del generador para cualquiera de las fases. La ecuación de

manera fasorial se indica a continuación [6]:

$$V_t = E_i - I_a Z_d = E_i - I_a R_a - j I_a X_d \quad (2)$$

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

$$Z_d = R_a + j X_d = R_a + j \omega (L_s + M_s) \quad (3)$$

Mientras que, para el generador en estado dinámico, se representa con el torque de aceleración el cual se obtiene mediante el producto del momento de inercia de la máquina por la aceleración angular.

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (4)$$

Cuando un cuerpo puesto en movimiento trata de oponerse se lo define como momento de inercia.

$$J = \frac{1}{2} m R^2 \quad (5)$$

En donde  $m$  es la masa del cuerpo y  $R$  es el radio del cuerpo. Por otro lado, el comportamiento del ángulo de potencia  $\delta$  en el estudio de estabilidad angular puede ser expresado con respecto a un eje de referencia que rote a velocidad sincrónica.

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (6)$$

Donde:

$\theta_m$  Posición angular con respecto al eje de referencia.

$\omega_s$  Velocidad sincrónica del generador.

$\delta_m$  Desplazamiento angular desde el eje de referencia.

El momento de inercia también puede ser llamado momento de inercia del rotor, y se puede representar con la letra  $M$ , y este a su vez en términos de  $H$  (constante de inercia).

$$M = \frac{2H}{\omega_s} S_B \quad (7)$$

Finalmente, como resultado de reemplazar las ecuaciones (5), (6), (7) en la ecuación (4) se obtiene la ecuación de oscilación [17][18].

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (8)$$

### 2.3.2 Transformadores

El transformador tiene como función principal elevar o disminuir el voltaje con la finalidad de garantizar condiciones de carga y mantener operativo el sistema. Considerando un transformador ideal se tiene un modelo de dos devanados que están enrollados alrededor de un núcleo magnético [19], en dicho modelo se puede considerar como despreciable la rama de magnetización siempre y cuando se trabaje en estado estable, por la razón de que la corriente de excitación es insignificante en comparación a la corriente de carga [20].

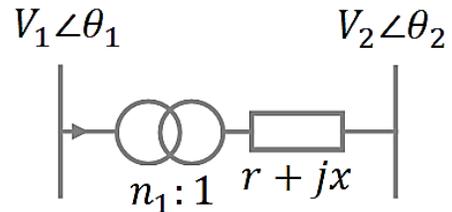


Figura 5. Transformador de 2 devanados con tap [20].

Donde:

$n_1$  Valor en por unidad del cambiador de tap.

$r + jx$  Resistencia y reactancia de primario y secundarios referidos al lado de bajo voltaje.

Al modelar el transformador mediante el modelo  $\pi$  con cambiador de taps, se tiene el siguiente circuito [21]:

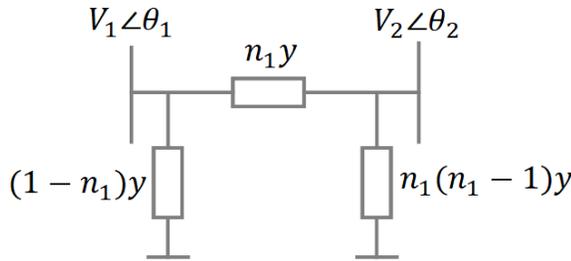


Figura 6. Modelo  $\pi$  del transformador [20].

Donde  $y$  es la admitancia del modelo y se expresa de la siguiente manera:

$$y = \frac{1}{n_1^2(r+jx)} \quad (9)$$

### 2.3.3 Líneas de transmisión

Son elementos que transportan la energía eléctrica desde la generación a la carga siendo un factor importante para la estabilidad del sistema y mantener niveles óptimos de voltaje. Una línea de transmisión se caracteriza por tres parámetros:

- $R$  Resistencia en  $[\Omega]$ .
- $X$  Reactancia serie en  $[\Omega]$ .
- $B$  Suceptancia paralelo en  $[S]$ .

Estos parámetros en función de la longitud de la línea de transmisión dan lugar a los distintos modelos de una línea de transmisión, donde están presentes la impedancia serie y la admitancia paralelo (Figura 7) [22].

$$Z = R + jX \quad (10)$$

$$Y = jB/2 \quad (11)$$

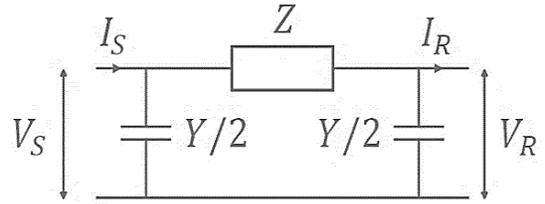


Figura 7. Modelo  $\pi$  de líneas de transmisión.

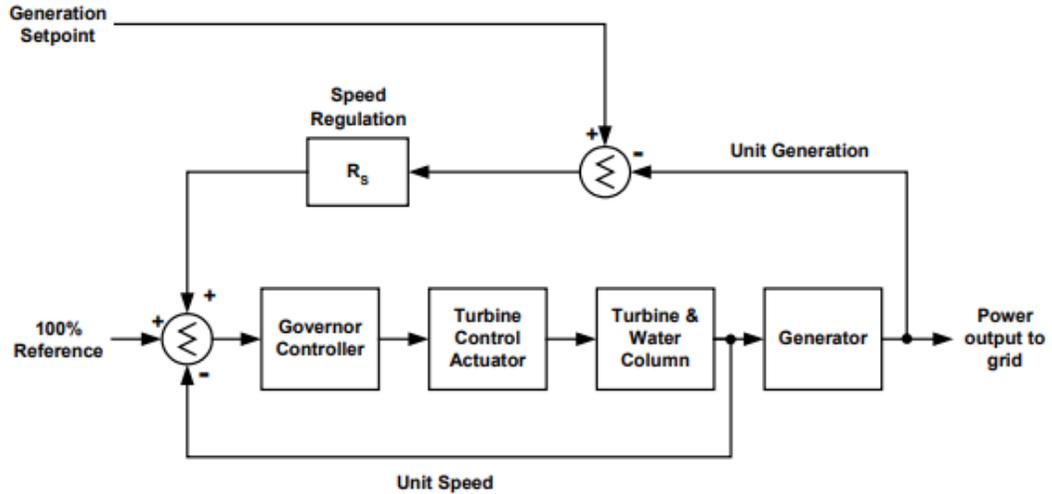
### 2.4 Reguladores de velocidad

Para contralar la velocidad de los generadores se utiliza un mecanismo el cual es responsable de controlar las válvulas de las turbinas de vapor ó la posición de las compuertas en las turbinas hidráulicas, ajustándose el torque mecánico. Esto ocurre en condiciones normales de operación y durante perturbaciones [10][23].

### 2.5 Reguladores de voltaje

En el sistema de excitación del generador, el regulador de voltaje es la parte principal, ya que es capaz de detectar cambios en el voltaje de salida, tomándose las medidas correspondientes para su restauración en caso de existir una variación no deseada en el SEP. Independientemente de la velocidad de excitación de la respuesta, este no se verá afectado hasta que el regulador de voltaje se lo indique. En el caso que se tenga un regulador lento, este influenciara a la estabilidad del sistema, por ello es importante indicar los parámetros de control proporcional para que el regulador aumente los límites de estabilidad del generador y por consecuencia las del sistema.

En la Figura 8, se presenta el diagrama de bloques propuesto por la IEEE, el cual contiene los dos reguladores antes mencionados y como



estos se integran a un generador sincrónico [24].

$$k_1 = hf(y_n, t_n) \quad (12)$$

Figura 8. Reguladores de velocidad y voltaje según IEEE [24].

### 3 Métodos de solución de la ecuación de oscilación

#### 3.1 Método Runge-Kutta 4to orden

El método Runge-Kutta, es un método explícito, en donde el valor de la variable dependiente  $x$  en cualquier valor de  $t$  se calcula a partir del conocimiento de los valores de  $x$  de los pasos de tiempo anteriores. En donde  $x$ , es el ángulo de los generadores y  $t$  es el tiempo de duración de la perturbación. Este método es adecuado implementarlo en el caso de estudio por la razón de que tiene una alta precisión [10][11].

Runge-Kutta se construye a partir del método de Taylor, en donde Runge-Kutta tiene la ventaja que elimina la necesidad de calcular y evaluar derivadas de  $F(t, x)$ , haciendo uso de proyecciones de punto medio [25][26]. La solución propuesta es equivalente a la aplicación de las fórmulas de Taylor de cuarto orden y se puede representar con base en la regla de 1/3 de Simpson de la siguiente manera [12]:

$$k_2 = hf\left(y_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{h}{2}\right) \quad (13)$$

$$k_3 = hf\left(y_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{h}{2}\right) \quad (14)$$

$$k_4 = hf(y_n + k_3, t_n + h) \quad (15)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}[k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4] \quad (16)$$

Donde:

- $k_1$  Pendiente inicio del intervalo
- $k_2$  Primera pendiente en la mitad del intervalo usando  $k_1$ .
- $k_3$  Segunda pendiente en la mitad del intervalo usando  $k_2$ .
- $k_4$  Pendiente al final del intervalo usando  $k_3$ .

La interpretación grafica de las pendientes estimadas para modelo de Runge-Kutta, se lo puede apreciar en la Figura 9.

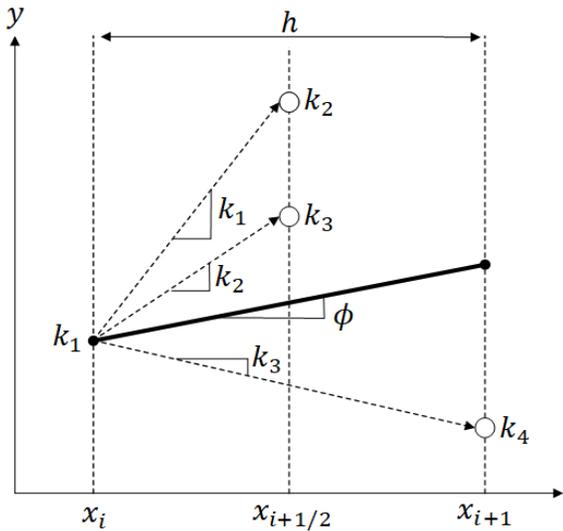


Figura 9. Método de Runge-Kutta 4º Orden.

En cuanto a este documento, las ecuaciones de cuarto orden de Runge-Kutta son:

$$k_1 = \Delta t * f(x_n, t_n) \quad (17)$$

$$k_2 = \Delta t * f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (18)$$

$$k_3 = \Delta t * f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (19)$$

$$k_4 = \Delta t * f(x_n + k_3, t_n + \Delta t) \quad (20)$$

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}[k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4] \quad (21)$$

### 3.2 Modelación matemática

Para un estudio de estabilidad angular es necesario conocer como parámetros iniciales, los elementos que conforman el sistema, obteniendo la matriz de admitancias conocida como “Ybarra”.

$$\vec{I} = \vec{Y} * \vec{V} \quad (22)$$

Donde  $\vec{Y}$  contiene los elementos de la matriz de admitancias,  $\bar{Y}_{ii}$  tiene los elementos diagonales de la matriz y  $\bar{Y}_{ij}$

tiene los elementos fuera de la diagonal [9][27].

$$\bar{Y}_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \quad (23)$$

$$\bar{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (24)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & \dots & -Y_{1j} \\ -Y_{21} & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ -Y_{i1} & \dots & \dots & Y_{ii} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Una vez obtenida la matriz de admitancia se procede a calcular la misma en condiciones previas a la falla, durante la falla y luego que la falla haya ocurrido  $Y_{Prefalla}$ ,  $Y_{Falla}$  y  $Y_{Postfalla}$ . Con la obtención de la matriz de admitancias, se puede determinar las matrices reducidas (n x n) empleando el método de Kron (26) [28][29]:

- Se proporcionan barras adicionales para los voltajes internos del generador, agregando la simulación de una impedancia de falla de ser necesario.
- Todos los elementos de impedancias se deben modificar en admitancias.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{nn} & \vdots & Y_{nr} \\ \dots & \vdots & \dots \\ Y_{rn} & \vdots & Y_{rr} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$Y_{Reducida} = Y_{nn} - [Y_{nr} * Y_{rr}^{-1} * Y_{rn}] \quad (27)$$

En donde n se usa para mencionar las barras de los generadores mientras que r se usa para los nodos restantes. Para obtener el voltaje interno de los generadores E, se debe partir de los datos de flujo de potencia.

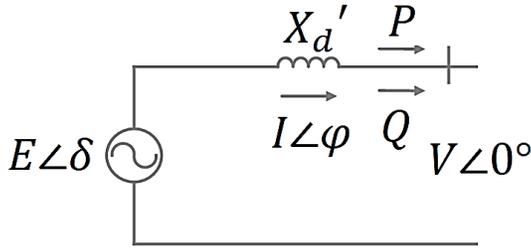


Figura 10. Modelo clásico de generador síncrono para estudios de estabilidad.

En términos de la potencia, se derivan las ecuaciones (28) y (29):

$$P + jQ = \bar{V} * \bar{I}^* \quad (28)$$

$$I_1 + jI_2 = (P - jQ)/V \quad (29)$$

Determinándose finalmente el voltaje interno del generador [9]:

$$E\angle\delta = \left( V + Q * \frac{X_d'}{V} \right) + j * \left( P * \frac{X_d'}{V} \right) \quad (30)$$

Donde:

$E$  Magnitud del voltaje interno del generador.

$\delta$  Ángulo del voltaje interno del generador.

$V$  Voltaje de la barra de generación.

$X_d'$  Reactancia transitoria del generador.

$P$  Potencia activa de generación.

$Q$  Potencia reactiva de generación.

La potencia en la red en una barra  $i$ , se establece como la salida de potencia eléctrica de la máquina  $i$ , definido como:

$$P_i = \text{Re}(\bar{E}_i * \bar{I}_i^*) \quad (31)$$

Al igualar los componentes reales e imaginarios, se puede obtener la siguiente ecuación, dada por:

$$P_{e_i} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1}^n E_i * E_j * Y_{Reducida_{ij}} * \text{Cos}(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (32)$$

Donde:

$E_i$  Magnitud del voltaje interno del generador  $i$ .

$E_j$  Magnitud del voltaje interno del generador  $j$ .

$Y_{Reducida_{ij}}$  Módulo de la matriz reducida  $ij$ .

$\theta_{ij}$  Ángulo de la matriz reducida  $ij$ .

$\delta_i$  Ángulo del voltaje interno del generador  $i$ .

$\delta_j$  Ángulo del voltaje interno del generador  $j$ .

En la modelación es necesario incluir la ecuación de oscilación ya que es la responsable del movimiento del rotor y relaciona el torque de inercia con los torque mecánicos y eléctricos [28] [29]. En donde,  $\delta$  y  $\omega_s$  son condiciones iniciales del ángulo del voltaje interno generado y la velocidad respectivamente.

### 3.3 Modelación de los sistemas reguladores

Para una máquina síncrona se considera dos casos de regulación: un regulador de voltaje y un regulador de velocidad. El regulador de velocidad al sufrir cambios en  $\omega$  produce cambios en el torque mecánico, el cual depende de la caída de velocidad además de la función de transferencia del regulador de velocidad y la fuente de energía primaria

(turbina), como se muestra en la Figura 11.

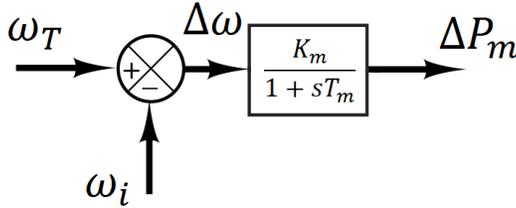


Figura 11. Modelación para un regulador de velocidad básico [24].

$$\frac{d\Delta P_m}{dt} = \frac{K_m}{T_m} [\omega_T - \omega_i] - \frac{\Delta P_m}{T_m} \quad (33)$$

Donde:

- $\omega_T$  Velocidad angular inicial.
- $\omega_i$  Velocidad angular final.
- $\Delta\omega$  Desplazamiento angular.
- $\Delta P_m$  Potencia mecánica
- $K_m$  Ganancia.
- $T_m$  Constante de tiempo

Los reguladores de voltaje tienen la facilidad de detectar cambios en el voltaje de salida. El diagrama de bloques presenta como modelo una relación en el dominio  $s$ , entre el cambio del voltaje de excitación y voltaje entre los terminales del generador, como se muestra en la Figura 12.

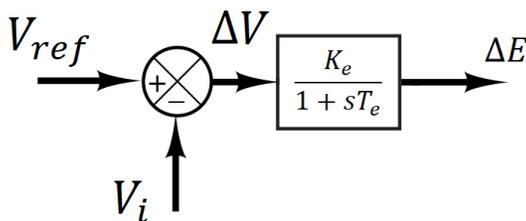


Figura 12. Modelación para un regulador de voltaje básico [24].

$$\frac{d\Delta E}{dt} = \frac{K_e}{T_e} [V_{ref} - V_i] - \frac{\Delta E}{T_e} \quad (34)$$

Donde:

- $V_{ref}$  Voltaje de referencia.
- $V_i$  Voltaje inicial.
- $\Delta V$  Variación de voltaje.
- $\Delta E$  Voltaje interno generado.
- $K_e$  Ganancia.
- $T_e$  Constante de tiempo.

#### 4 Implementación del modelo matemático

Los sistemas eléctricos de potencia están sometidos comúnmente a perturbaciones, de pequeña o gran magnitud que puede causar la inestabilidad angular. El no poder reintegrar el sistema al estado inicial de operación conlleva a consecuencias tales como: el aumento de la oscilación angular de varios generadores perdiendo el sincronismo con respecto a los otros generadores del sistema, disminución en la transferencia de potencia e incluso un apagón total, conocido como Blackout.

Se considera un estudio de estabilidad angular mediante la ecuación de oscilación y el método de Runge-Kutta, el cual permite conocer el comportamiento de los ángulos y las potencias, cuando se agrega reguladores de velocidad y voltaje a las máquinas síncronas.

Para completar el estudio de estabilidad angular son integradas las gráficas del comportamiento de las oscilaciones de ángulo de las máquinas con respecto a valores iniciales,

comparando así los resultados obtenidos. Se considera el software MATLAB para la realización del modelo de estabilidad angular.

#### 4.1 Sistema propuesto para estudio de estabilidad

Para realizar el análisis referente a la estabilidad angular se toma como referencia el sistema de 9 barras propuesto por la IEEE indicado en la Figura 13.

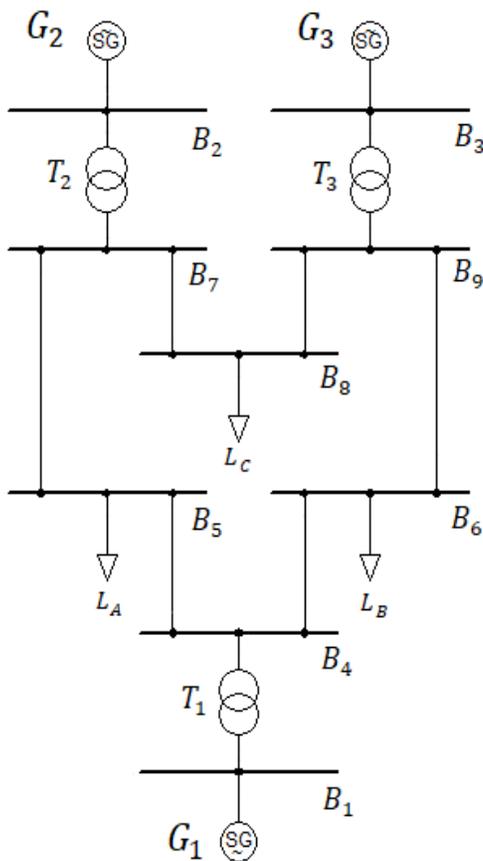


Figura 13. Sistema IEEE de 9 barras [13].

#### 4.2 Modelo para estudio de estabilidad

A continuación, se muestra el algoritmo implementado para resolver la ecuación de oscilación mediante el modelo de Runge-Kutta en un SEP multimáquina.

#### Algoritmo Estabilidad Angular

##### Paso 1:

Ingreso de Datos del sistema.

##### Paso 2:

Construcción de la  $Y_b$  antes, durante y después de la perturbación.

##### Paso 3:

Matrices  $Y_{nn}$ ,  $Y_{nr}$ ,  $Y_{rn}$ ,  $Y_{rr}$  a partir del Paso 2.

##### Paso 4:

Reducción de la  $Y_b$  obtenidas en el Paso 3.

$Y_{Reducida} = Y_{nn} - (Y_{nr} * Y_{rr}^{-1} * Y_{rn})$

$Y_{Reducida}$ : Matriz de admitancias reducidas.

##### Paso 5:

$E \angle \delta$

$E$ : Voltaje interno generado en cada generador

##### Paso 6:

Condiciones iniciales para:

$W_{sinc}$ : Generadores

$V, \theta$ : Regulación de voltaje

$\Delta P_m, \Delta E$ : Regulación de velocidad.

##### Paso 7: Runge-Kutta

Constantes  $K_m, K_e, T_m$  y  $T_e$

Tiempo de análisis =  $Time/dt$

$t < t_{prefalla}$ ,  $Y_b$  Reducida Prefalla

$t_{pre} < t < t_{despeje}$ ,  $Y_b$  Reducida Falla

$t > t_{despeje}$ ,  $Y_b$  Reducida Posfalla

##### Paso 8: Potencia Eléctrica

$P_e(i)$ : Pot. Eléctrica para  $n$  generadores

##### Paso 9: Proyección de Punto Medio Para $t = 0$

Inicio del intervalo.

$w1(i), d1(i), \Delta P_{m1}(i), \Delta P_{e1}(i), \Delta E1(i)$

Proyección de Punto Medio Para  $t = dt/2$

Segunda Proyección

$w2(i), d2(i), \Delta P_{m2}(i), \Delta P_{e2}(i), \Delta E2(i)$

Proyección de Punto Medio Para  $t = dt$

Tercera Proyección.

$w3(i), d3(i), \Delta P_{m3}(i), \Delta P_{e3}(i), \Delta E3(i)$

Proyección de Punto Medio Para  $t = 0.5$

Final del intervalo.

$w4(i), d4(i), \Delta P_{m4}(i), \Delta P_{e4}(i), \Delta E4(i)$

##### Paso 10: Formulación de las Ec's Diferenciales

$w_r(i) \rightarrow$  Vel. Angular,  $d_r(i) \rightarrow$  Angulo del Gen,

$\Delta P_{mr}(i) \rightarrow$  Pot. Mecánica,  $\Delta P_{er}(i) \rightarrow$  Pot. Eléctrica,

$E_r(i) \rightarrow$  Voltaje interno generado.

##### Paso 11:

Solución de las Ec's Diferenciales obtenidas en el Paso 10.

##### Paso 12: Regulador de Velocidad

Si Reg-Vel = True  $\{P_m(i) = P_m(i) + P_{mr}(i)\}$

##### Paso 13: Regulador de Voltaje

Si Reg-Vol = True  $\{E(i) = E(i) + E_r(i)\}$

##### Paso 14: Valores Finales Aplicando Reguladores

$d_{i\_gen}$ : Angulo de los generadores

$w_{i\_gen}$ : Velocidad angular

$E_{i\_gen}$ : Voltaje interno generado

$P_m$ : Potencia Mecánica

$P_e$ : Potencia Eléctrica

##### Paso 15: Graficas

Figura 1: [Tiempo, Angulo Generador]

Figura 2: [Tiempo, Angulo Final - Angulo Inicial]

## 5 Análisis de resultados

En el análisis de resultados se propone determinar a partir de los ángulos del rotor de los generadores, la estabilidad transitoria con cuatro casos propuestos: sin utilizar reguladores, utilizando reguladores de voltaje, utilizando reguladores de velocidad y utilizando ambos reguladores.

En el planteamiento del problema se tiene una falla trifásica en la línea 5-7 cercana a la barra 7. Dicha falla tiene una duración de 5 ciclos (0.083 segundos). En donde los generadores se encuentran representados por el modelo clásico y las cargas por impedancias constantes.

Como resultado de cada caso se obtiene una gráfica de los ángulos de cada generador y otra gráfica con la diferencia de los ángulos, donde se toma como referencia al generador 1.

La diferencia de los ángulos permite determinar si el sistema es estable o inestable. Si la diferencia angular alcanza valores máximos y luego decrecen el sistema es estable, mientras que si la diferencia angular se incrementa indefinidamente el sistema es inestable.

Además de las gráficas mencionadas anteriormente, se tiene las gráficas del comportamiento para el voltaje interno generado y las potencias mecánicas de cada generador, los cuales determinan la correcta implementación de los reguladores con sus respectivas ganancias y constantes de tiempo.

Los resultados obtenidos del estudio de estabilidad angular sin aplicar reguladores se indican en la Figura 14.

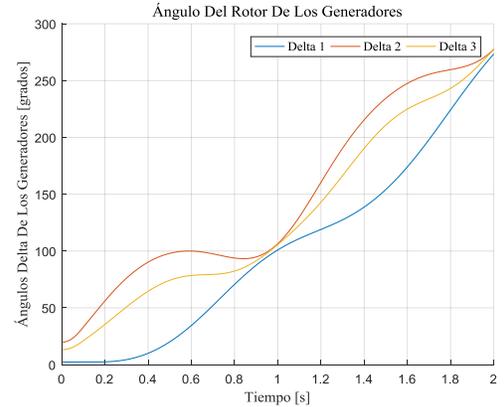


Figura 14. Ángulos de los rotores de los generadores. Sin Reguladores.

En donde se puede apreciar que todos los generadores comienzan a oscilar y el incremento angular inicia con los generadores 2 y 3 produciendo una desaceleración. También se puede mirar que el grupo de los generadores alcanza un ángulo máximo de  $279.2^\circ$  para un tiempo de 2 segundos.

En la Figura 15., se presenta la diferencia de ángulos y se puede observar un ángulo máximo alcanzado de  $80.68^\circ$  en un tiempo de 0.43 segundos, lo que indica que el generador 2 alcanzó mayor oscilación.

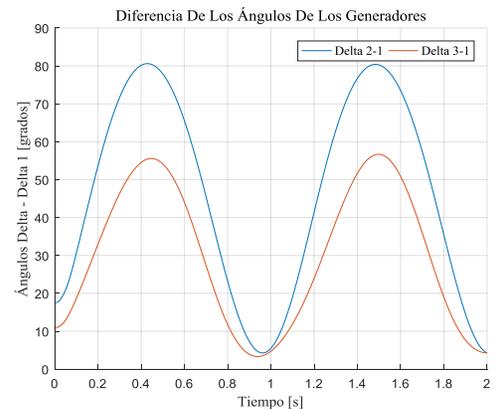


Figura 15. Diferencia angular. Sin Reguladores.

Para los resultados obtenidos del estudio de estabilidad angular empleando solo reguladores de voltaje, se incorpora

el modelo descrito en la ecuación (34), con los siguientes valores:

$$K_e = 0.05 \quad \text{Ganancia}$$

$$T_e = 10 \quad \text{Constante de tiempo}$$

La Figura 16 se aprecia el comportamiento de los ángulos de los rotores. En donde se puede ver que todos los generadores comienzan a oscilar y el incremento angular inicia con los generadores 2 y 3 produciendo una desaceleración. También se puede ver que el grupo de los generadores alcanzo un ángulo máximo de  $277.6^\circ$  para un tiempo de 2 segundos.

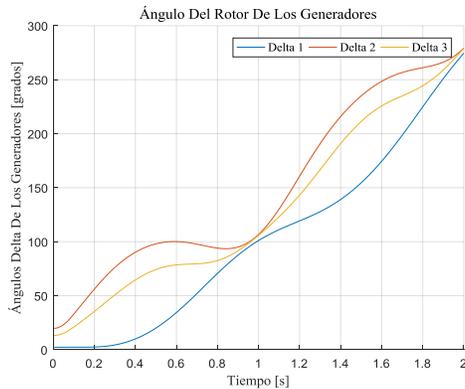


Figura 16. Ángulos de los rotores de los generadores. Reguladores de Voltaje.

En la Figura 17 de la diferencia de ángulos, se puede observar un ángulo máximo alcanzado de  $80.61^\circ$  en un tiempo de 0.43 segundos, lo que indica que el generador 2 alcanzo mayor oscilación, siendo de un valor menor que el logrado sin reguladores.

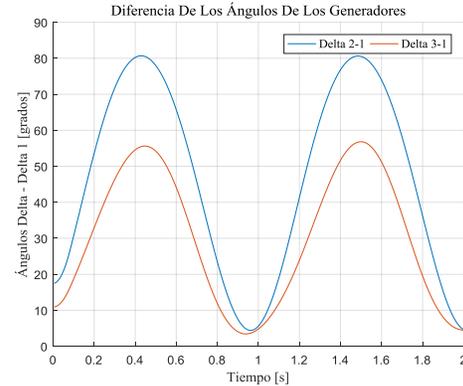


Figura 17. Diferencia angular. Reguladores de Voltaje.

En la Figura 18 se puede observar que, al utilizar los reguladores de voltaje, el voltaje interno generado de cada generador sufre una variación como es de esperarse luego de la falla. En donde, estos valores son muy pequeños que no afectan considerablemente al sistema.

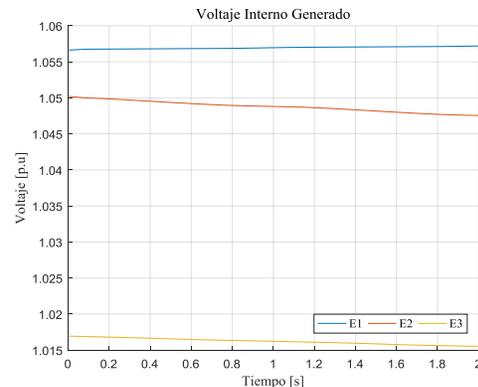


Figura 18. Voltaje interno generado en los generadores con reguladores de voltaje.

Para los resultados obtenidos del estudio de estabilidad angular utilizando solo reguladores de velocidad, se incorpora el modelo descrito en la ecuación (33) con los siguientes valores:

$$K_m = 1 \quad \text{Ganancia}$$

$$T_m = 0.002 \quad \text{Constante de tiempo}$$

La Figura 19 muestra la actuación de los ángulos de los rotores. En donde se puede visualizar que todos los

generadores comienzan una oscilación, pero con una escala muy pequeña en comparación a la de los casos anteriores.

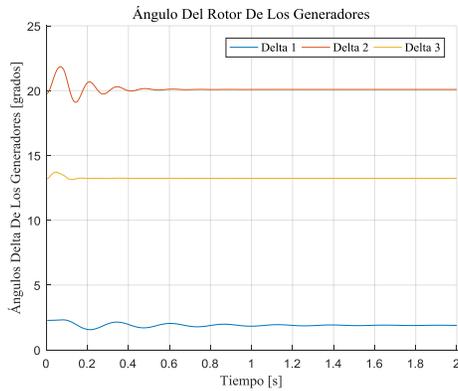


Figura 19. Ángulos de los rotors de los generadores. Reguladores de Velocidad.

En la Figura 20 existe la diferencia de ángulos y se puede observar un ángulo máximo alcanzado de  $19.53^\circ$  en un tiempo de 0.07 segundos, lo que indica que el generador 2 alcanzó mayor oscilación.

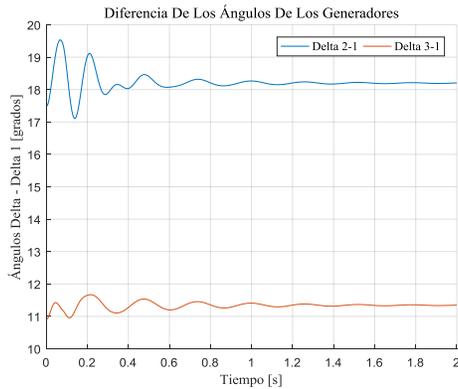


Figura 20. Diferencia angular. Reguladores de Velocidad.

Para las potencias mecánicas de los generadores, se observa en la Figura 21 que los generadores 2 y 3 comienzan a oscilar. Sin embargo, estos valores se amortiguan en un tiempo de 1.2 segundos gracias a los reguladores de velocidad implementados.

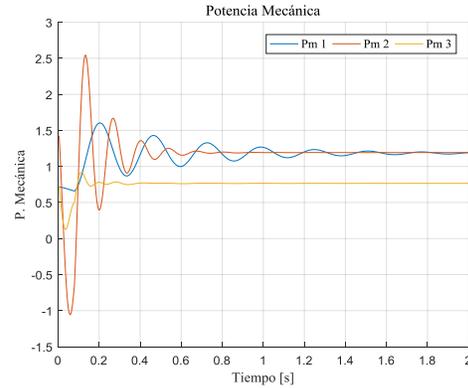


Figura 21. Potencias Mecánicas de los generadores con reguladores de Velocidad.

En el último caso se utilizó las mismas ganancias y constantes de tiempo indicados en los casos de reguladores de velocidad y voltaje, en donde se obtiene el siguiente comportamiento de los ángulos de los rotors ilustrados en la Figura 22.

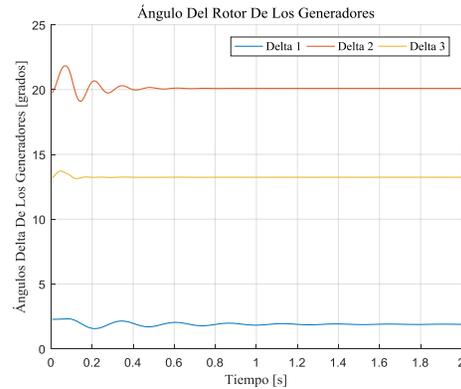


Figura 22. Ángulos de los rotors de los generadores. Reguladores de Velocidad y Voltaje.

En donde se puede ver que todos los generadores comienzan oscilaciones angulares con los mismos valores del caso de estudio de solo reguladores de velocidad. Sin embargo, los valores de los voltajes internos generadores son diferentes ya que también se incluyen los reguladores de voltaje.

En la Figura 23, la diferencia de ángulos se puede observar un ángulo máximo alcanzado de  $19.53^\circ$  en un tiempo de 0.07 segundos, lo que indica

que el generador 2 alcanzó mayor oscilación.

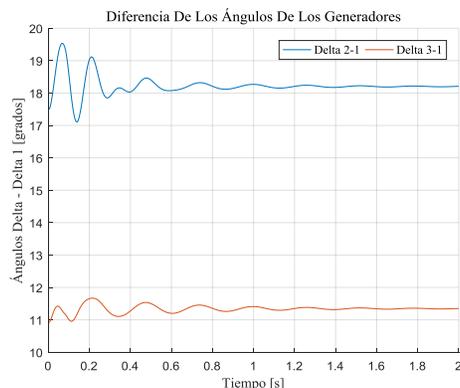


Figura 23. Diferencia angular. Reguladores de Velocidad y Voltaje.

Como es de esperarse en la Figura 24 los voltajes internos generados no presentan mayor variación en comparación al caso de estudio sin utilizar reguladores ya que para este caso se incluyen los reguladores de voltaje que llegan a mantener en niveles adecuados los valores de E.

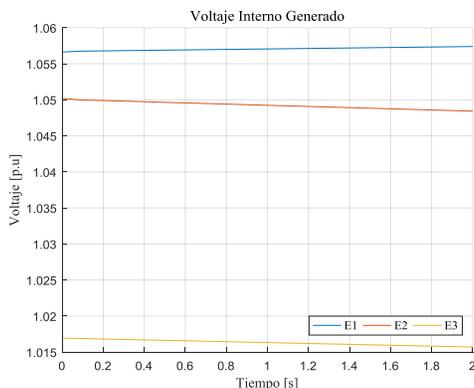


Figura 24. Voltaje interno generado en los generadores. Reguladores de Voltaje y Velocidad.

Para las potencias mecánicas de los generadores, se observa en la Figura 25 que los generadores 2 y 3 comienzan a oscilar. Donde los valores se amortiguan en un tiempo de 1.2 segundos, siendo los mismos que el caso de estudio de solo reguladores de velocidad.

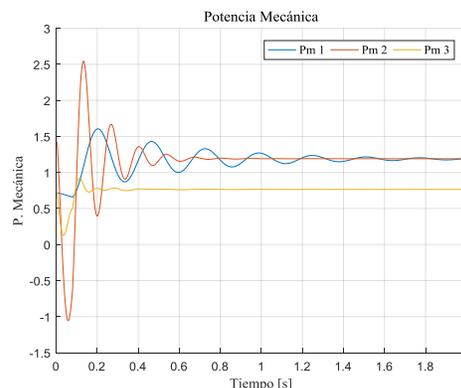


Figura 25. Potencias Mecánicas de los generadores. Reguladores de Velocidad y Voltaje.

Al tener todos los casos de estudio, se puede observar que los generadores que sufrieron mayor oscilación fueron los que se encontraron más cercanos a la falla y no perdieron sincronismo ya que ninguna diferencia de ángulos excedió el valor de ángulo máximo de  $90^\circ$ .

Por otro lado, al aplicar los reguladores se puede apreciar una reducción considerable en las oscilaciones de los ángulos de los rotores, mejorando la estabilidad del sistema eléctrico de potencia.

## 6 Conclusiones

Para la solución de la ecuación de oscilación se puede utilizar diversos métodos numéricos. Sin embargo, el método de Runge-Kutta permite obtener un mejor análisis de las curvas de oscilación que se plantean en el problema de estabilidad con una mejor precisión.

Los reguladores tanto de velocidad como de voltaje, al tener correctamente parametrizados los valores de ganancias y constantes de tiempo, permiten garantizar la estabilidad del sistema ante una perturbación.

El modelo implementado en el presente documento para estabilidad angular puede ser realizado para cualquier SEP, donde los generadores

deben ser representados por el modelo clásico y las cargas por impedancias constantes.

La estabilidad y sus fenómenos asociados cuando son estudiados son de gran importancia ya que permiten tener un mayor grado de confiabilidad en la operación del SEP.

Los generadores sincrónicos al estar sometidos a constantes cambios físicos como mecánicos pueden perder su estabilidad por ello es necesario incorporar los reguladores de voltaje y velocidad ya que con ellos los valores de voltaje y potencia no se ven ampliamente afectados.

## 6.1 Trabajos futuros

Los resultados obtenidos a partir de este documento pueden ser tomados para desarrollar futuras investigaciones como:

- Incorporar modelos de reguladores en los cuales sean incluidos turbinas y excitatrices en los reguladores de velocidad y voltaje respectivamente.
- Incrementar el PSS (Power System Stabilizer) en el regulador de voltaje.
- Optimización de los parámetros de los reguladores ganancias y constantes de tiempo, definiendo una función objetivo adecuada.

## 7 Referencias

- [1] N. Zhou, D. Trudnowski, J. W. Pierre, S. Sarawgi, and N. Bhatt, "An algorithm for removing trends from power-system oscillation data," in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp. 1–7.
- [2] J. Fang, C. Su, Z. Chen, H. Sun, and P. Lund, "Power System Structural Vulnerability Assessment Based on an Improved Maximum Flow Approach," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 777–785, Mar. 2018.
- [3] P. Kundur; J. Paserba; V. Ajjarapu; G. Andersson; A. Bose; C. Cañizares; N. Hatziaargyriou; D. Hill; A. Stankovic; C. Taylor; T. Van Cutsem; V. Vittal, "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004.
- [4] M.-E. Hamedani-golshan, A. Davoudi, and A. Bidram, "Loading constraints for first swing stability margin enhancement of distributed generation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 6, no. 12, pp. 1292–1300, Dec. 2012.
- [5] Xiaoyu Wang and W. Freitas, "Influence of Voltage Positive Feedback Anti-Islanding Scheme on Inverter-Based Distributed Generator Stability," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 2, pp. 972–973, Apr. 2009.
- [6] C. Barrera and J. Játiva, *Análisis de Estabilidad Angular en un Sistema de Laboratorio*, vol. 33, no. 1. [Verlag nicht ermittelbar], 2014.
- [7] M. F. Trebilcock, F. Santamaría, and J. A. Alarcón, "ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA EN UN SISTEMA INDUSTRIAL CON GENERACIÓN PROPIA INTERCONECTADO CON EL SISTEMA DE POTENCIA," *Inf. tecnológica*, vol. 25, no. 1, pp. 77–

- 84, 2014.
- [8] W. S. Zimmermann, S. Hopp, M. Bondeur, and Der-Nien Chen, "Transient stability study of the Hsin Yu Co-Generation plant in Hsin-Chu science based industrial park in Taiwan," in *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)*, vol. 1, pp. 452–457.
- [9] P. Anderson and A. Fouad, *Power System Control And Stability*. .
- [10] P. Kundur, N. Balu, and M. Lauby, *Power System Stability and Control*. 1994.
- [11] E. Hernández, "Metodología Para El Análisis En Estado Estacionario De Sistemas Eléctricos No Lineales," IPN, Mexico, 2004.
- [12] E. Cruz and R. Lizama, "Software Para Integración de Funciones y Solución de Ecuaciones Diferenciales Por Métodos Numéricos," PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ ESCUELA DE GRADUADOS, 2006.
- [13] S. A. Shaikh, K. Kumar, A. R. Solangi, S. Kumar, and A. A. Soomro, "Short Circuit Analysis & Over current Relaying Coordination of IEEE 9-Bus System," in *2018 5th International Multi-Topic ICT Conference (IMTIC)*, 2018, pp. 1–6.
- [14] C. Gallardo, D. Andagoya, G. Salazar, and H. Arcos, *Análisis de Estabilidad Angular del Sistema Eléctrico Ecuatoriano con Alta Penetración Eólica*, vol. 33, no. 1. [Verlag nicht ermittelbar], 2014.
- [15] E. W. Kimbark, *Power system stability*. IEEE Press, 1995.
- [16] R. Natarajan, *Computer - Aided Power System Analysis*. Marcel Dekker, 2002.
- [17] U. G. Vaidya, R. N. Banavar, and N. M. Singh, "A chaotic phenomenon in the damped power swing equation," in *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.99CH36304)*, vol. 5, pp. 4650–4655.
- [18] Jun Zhou and Y. Ohsawa, "Improved Swing Equation and Its Properties in Synchronous Generators," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 56, no. 1, pp. 200–209, Jan. 2009.
- [19] D. J. Glover and M. . Sarma, *Power System Analysis & Design*, SI. 2012.
- [20] C. Javier Jiménez Salazar, "Incorporación de Modelos de Carga en Estado Estable Para el Cálculo de Flujos de Potencia," Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [21] O. Manoochehri, A. Asoodeh, and K. Forooghi, " $\pi$  Model Dual-Band Impedance Transformer for Unequal Complex Impedance Loads," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 25, no. 4, pp. 238–240, Apr. 2015.
- [22] L. H-Restrepo Gladys Caicedo Delgado Ferley Castro-Aranda, "Transmission line models for electromagnetic transients in power systems," 2008.
- [23] IEEE Power Engineering Society., Power Development and Power Generation Committee., Institute of Electrical and Electronics Engineers., and IEEE-SA Standards Board., *IEEE recommended practice for preparation of equipment specifications for speed-governing of hydraulic turbines intended to drive electric generators*. Institute

- of Electrical and Electronics Engineers, 2007.
- [24] IEEE, *1207-2011 IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units*. 2011.
  - [25] R. L. Burden, J. D. Faires, and A. M. Burden, *Numerical analysis*. .
  - [26] M. Syai'in and Kuo Lung Lian, "Microgrid power flow using Homotopic and Runge-Kutta Method," in *2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, 2015, pp. 1–8.
  - [27] C. A. Vásquez Barba, "Óptima ubicación de fuentes de generación distribuida basado en el perfil de tensión de sistemas," 2016.
  - [28] A. M. Kettner and M. Paolone, "On the Properties of the Power Systems Nodal Admittance Matrix," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 1130–1131, Jan. 2018.
  - [29] F. Dorfler and F. Bullo, "Kron Reduction of Graphs With Applications to Electrical Networks," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 60, no. 1, pp. 150–163, Jan. 2013.

## 7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 1. Matriz de Estado del Arte

ESTABILIDAD ANGULAR DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA CONSIDERANDO LA INTEGRACIÓN DE REGULADORES DE VELOCIDAD Y VOLTAJE																					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Estabilidad Angular	Regulador de Voltaje	Regulador de Velocidad	Runge-Kutta	Estabilidad Transitoria	Modelación de sistemas de potencia	Estabilidad Angular	Sistemas de control de velocidad y voltaje	Estabilidad sistemas multimáquina	Inestabilidad de sistemas de potencia	Modelos de reguladores de velocidad y voltaje	Métodos numéricos	Runge-Kutta	Regulación de velocidad y voltaje	Modelación de reguladores de velocidad y voltaje	Integración de reguladores de velocidad y voltaje	Ganancias de reguladores	Constantes de tiempo de reguladores
1	2008	An algorithm for removing trends from power-system oscillation data	35					☒		☒				☒					☒		
2	2016	Power System Structural Vulnerability Assessment Based on an Improved Maximum Flow Approach	11						☒						☒						
3	2012	Loading constraints for first swing stability margin enhancement of distributed generation	8	☒				☒		☒							☒				
4	2009	Influence of Voltage Positive Feedback Anti-Islanding Scheme on Inverter-Based Distributed Generator Stability	20		☒			☒			☒		☒				☒				
5	2014	Análisis de Estabilidad Transitoria en un Sistema Industrial con Generación Propia Interconectado con el Sistema de Potencia	7					☒			☒										
6	2000	Transient stability study of the Hsin Yu Co-Generation plant in Hsin-Chu science based industrial park in Taiwan	7					☒			☒		☒								
7	2008	Power System Control and Stability	5202	☒			☒	☒		☒			☒		☒	☒		☒			
8	1994	Power System Stability and Control.	21327	☒							☒		☒								
9	2010	Numerical analysis	292				☒								☒	☒					
10	2015	Microgrid power flow using Homotopic and Runge-Kutta Method	14				☒		☒				☒								
11	2018	Short Circuit Analysis & Over current Relaying Coordination of IEEE 9-Bus System	0	☒							☒		☒								
12	2014	Análisis de Estabilidad Angular del Sistema Eléctrico Ecuatoriano con Alta Penetración Eólica	0	☒						☒			☒								
13	2014	Análisis de Estabilidad Angular en un Sistema de Laboratorio	1	☒				☒					☒								

14	1995	Power system stability	758							✗			✗							
15	2002	Computer - Aided Power System Analysis.	74				✗								✗					
16	2004	Definition and Classification of Power System Stability	2417	✗						✗	✗		✗							
17	2012	Power System Analysis & Design	1388	✗						✗										
18	2018	Incorporación de Modelos de Carga en Estado Estable Para el Cálculo de Flujos de Potencia	0						✗					✗				✗		
19	2015	$\pi$ Model Dual-Band Impedance Transformer for Unequal Complex Impedance Loads	23						✗											
20	2008	Transmission line models for electromagnetic transients in power systems	12	✗					✗											
21	2007	recommended practice for preparation of equipment specifications for speed-governing of hydraulic turbines intended to drive electric generators	2	✗	✗	✗							✗					✗	✗	✗
22	2016	Óptima ubicación de fuentes de generación distribuida basado en el perfil de tensión de sistemas	0						✗				✗							
23	2004	Metodología Para El Análisis En Estado Estacionario De Sistemas Eléctricos No Lineales	0	✗					✗				✗							
24	2006	Software Para Integración de Funciones y Solución de Ecuaciones Diferenciales Por Métodos Numéricos	0				✗								✗					
25	2017	On the Properties of the Power Systems Nodal Admittance Matrix	5						✗				✗							
26	2013	Kron Reduction of Graphs with Applications to Electrical Networks	336	✗					✗											
27	2009	Improved Swing Equation and Its Properties in Synchronous Generators	23	✗									✗							
28	1999	A chaotic phenomenon in the damped power swing equation	7	✗									✗					✗		✗
CANTIDAD:			14	2	1	5	9	7	6	1	10	12	4	4	3	4	1	4	2	1

## 7.2 Resumen de Indicadores

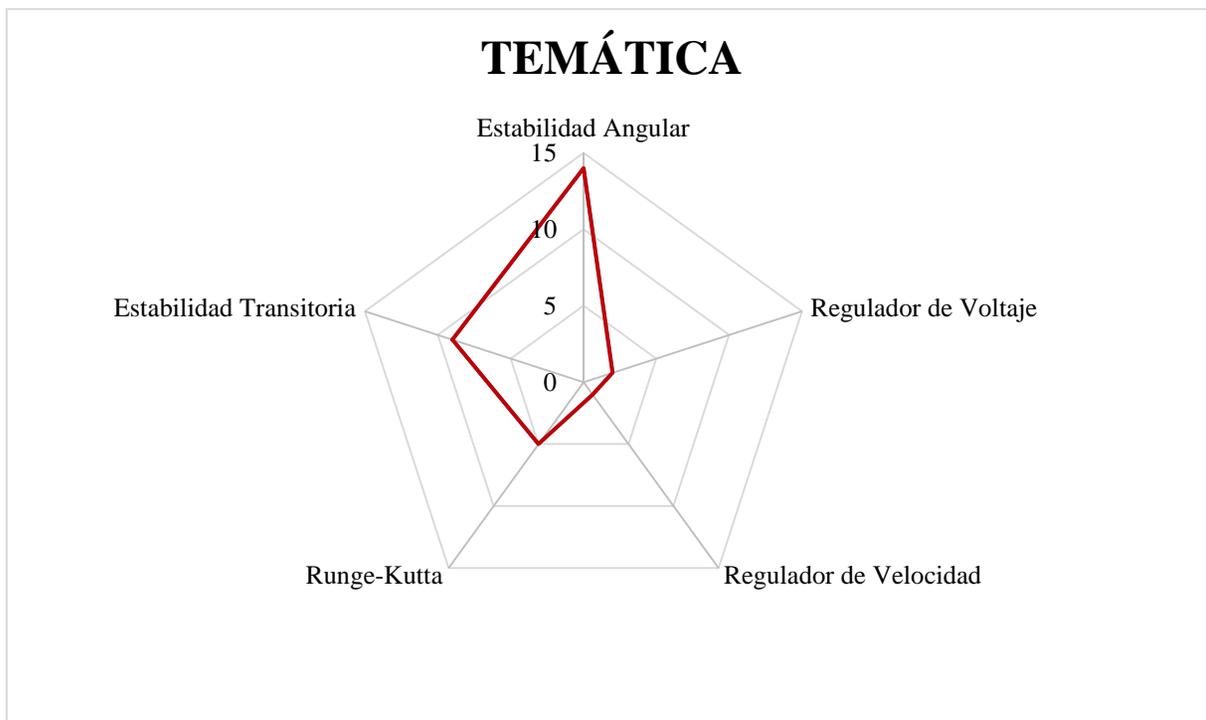


Figura 26. Resumen e Indicador de la Temática - Estado del Arte

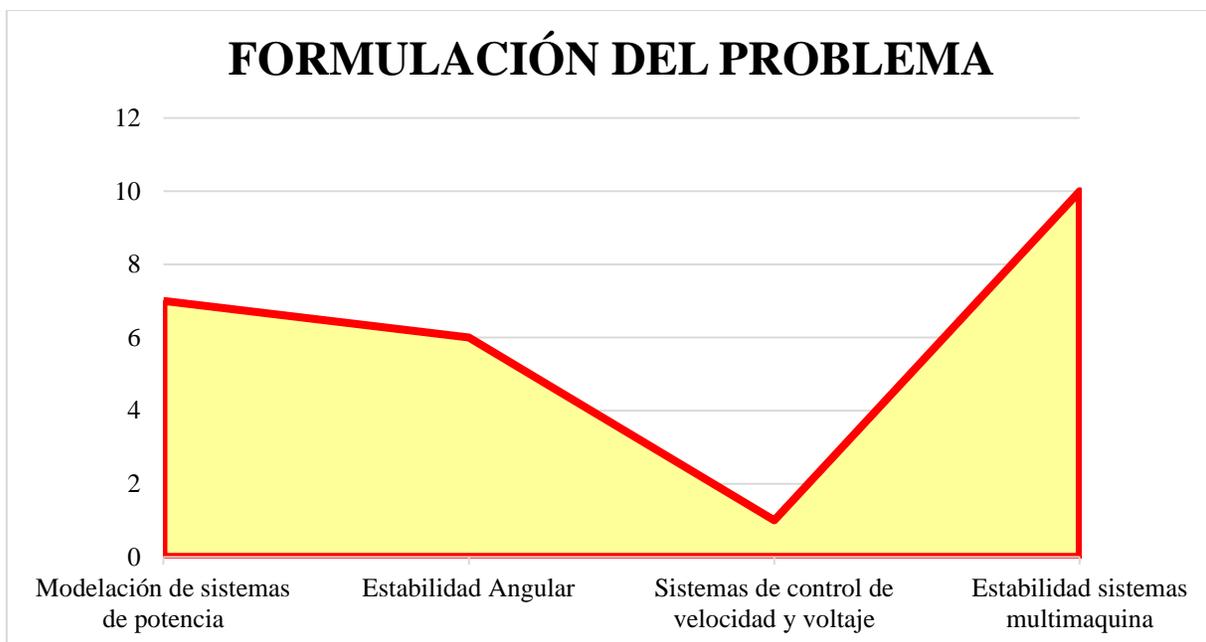


Figura 27. Indicador de la formulación del problema – Estado del Arte

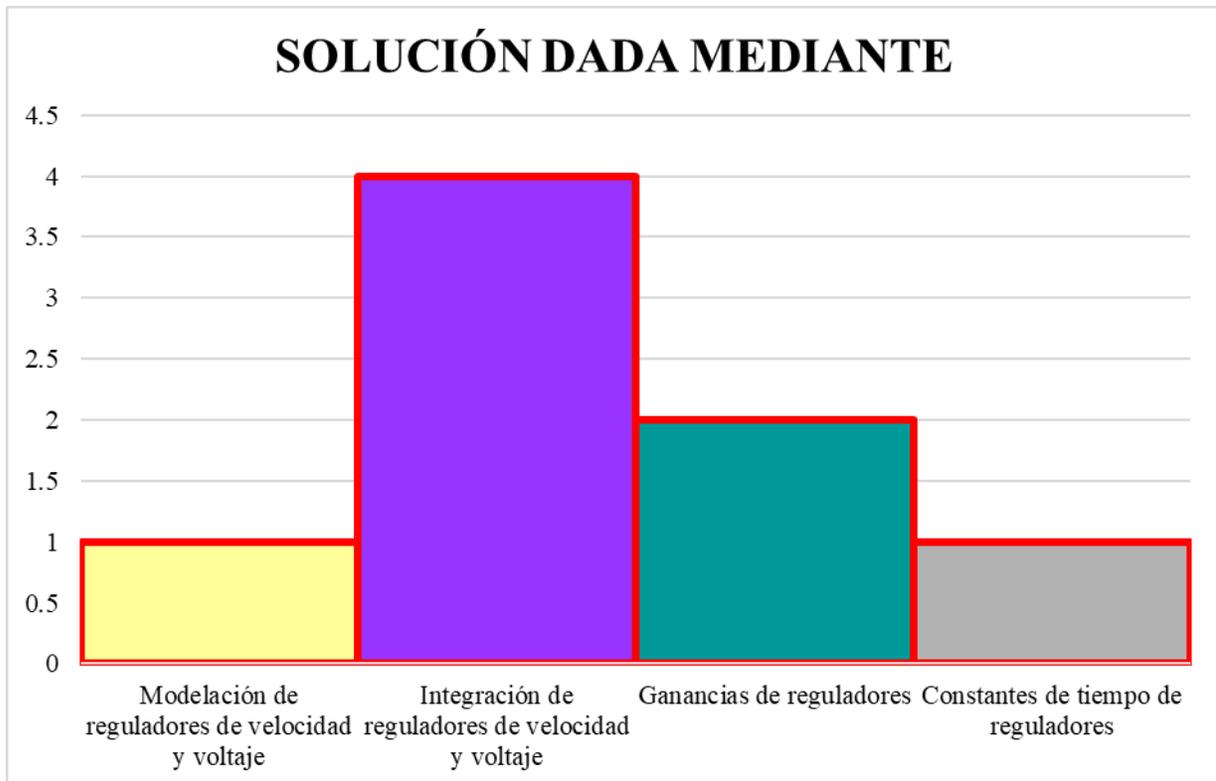


Figura 28. Indicador de solución – Estado del Arte

## 8 Anexos

Tabla 2. Parámetros de las Líneas y Cargas del Sistema IEEE de 9 Barras.

Parámetros de la Líneas de Transmisión				Transformación de Carga a admitancia constante		
DESDE	HASTA	R [p.u.]	X [p.u.]	Y/2 [p.u.]	G [p.u.]	B [p.u.]
4	5	0.0100	0.0850	0.0880	0.000000000	0.000000000
4	6	0.0170	0.0920	0.0790	0.000000000	0.000000000
5	7	0.0320	0.1610	0.1530	1.260976262	-0.504390505
6	9	0.0390	0.1700	0.1790	0.877611554	-0.292537185
7	8	0.0085	0.0720	0.0745	0.000000000	0.000000000
8	9	0.0119	0.1008	0.1045	0.968959833	-0.339060000
1	4	0.0000	0.1184	0.0000	0.000000000	0.000000000
2	7	0.0000	0.1823	0.0000	0.000000000	0.000000000
3	9	0.0000	0.2399	0.0000	0.000000000	0.000000000

Tabla 3. Parámetros de los Generadores del Sistema IEEE de 9 Barras.

Datos de los Generadores						
H [MW*s]	Pm [p.u.]	X <sub>d</sub> ' [p.u.]	θ [grad]	V [p.u.]	P [p.u.]	Q [p.u.]
23.64	0.7163577	0.0608	0	1.040	0.7163577	0.27024337
6.4	1.629955043	0.1198	9.280018	1.025	1.62995504	0.06647461
3.01	0.849961462	0.1813	4.664742	1.025	0.84996146	-0.10872716