

# **ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES EN LA FUNCIÓN CARACTERÍSTICA DE PEQUEÑA SEÑAL DE UN SISTEMA DE POTENCIA CON RETARDOS Y CONTROLADO POR PSS'S.**

Tutor

PROF. ALEXANDER MOLINA CABRERA, PH.D UNIVERSIDAD  
TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Trabajo presentado al programa de maestría en Ingeniería  
eléctrica como requisito parcial para optar al título de magister en  
Ingeniería eléctrica

NOVIEMBRE 16 DEL 2018

*Este trabajo es dedicado a:*

*Mi familia*

# Agradecimientos:

Agradecimientos al Ph.D. Alexander Molina Cabrera por su gran apoyo y colaboración.

# Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	6
1.1 Planteamiento del problema .....	6
1.2 Justificación.....	8
1.3 Objetivos.....	9
1.3.1 Generales .....	9
1.3.2 Específicos .....	9
1.4 Estado del arte .....	10
2. FORMULACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA .....	12
2.1 Elementos principales de un sistema de potencia .....	12
2.1.1 Unidad de generación.....	13
2.1.2 Redes de transmisión .....	14
2.1.3 Modelos de carga.....	15
2.2 El modelo no lineal general.....	16
2.3 Tiempo de retardo en el canal de realimentación.....	18
2.4 Modelamiento del retardo usando PADE.....	19
2.5 Simulación de los efectos desestabilizadores del retardo en un sistema de potencia .....	22
3. PROPUESTA DE CONTROL Y ANÁLISIS CUALITATIVO .....	25
3.1 PSS's. Funcionamiento de los PSS's.....	25
3.1.1 Estabilizador Delta-Omega: .....	27
3.2 Propuesta de Control global del sistema de potencia usando señales remotas con retardos.....	28
4. SIMULACIONES, RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	31
4.1 Resultados del funcionamiento de la estrategia delta – w .....	32
4.1.1 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.1$ (estrategia delta – w).....	33
4.1.2 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.2$ (estrategia delta – w).....	35
4.1.3 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.3$ (estrategia delta – w).....	37
4.2 Resultados del funcionamiento de la estrategia delta–w modificado multiárea con retardo .....	38
4.2.1 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.1$ (estrategia delta–w modificada Multiárea).....	39

4.2.2 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.2$ (estrategia delta – w modificada)	41
4.2.3 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.6$ (estrategia delta – w modificada)	43
4.2.4 Simulación con tiempo de retardo $T_d=1.0$ (estrategia delta – w modificada)	45
4.3 Análisis en frecuencia del sistema de prueba	47
4.3.1 Análisis en frecuencia con la estrategia delta-w sin retardo	47
4.3.2 Análisis en frecuencia con la estrategia delta-w con retardo	48
4.3.3 Análisis en frecuencia con la estrategia MultiArea con retardo	49
5. CONCLUSIONES	51
6. REFERENCIAS	52

# Lista de Figuras

Figura 1. Gráfico comparativo en el tiempo de la aproximación de Padé y el retardo ideal a) Orden 2. b) diferentes órdenes.....	20
Figura 2. Imagen comparativa de las respuestas sin retardo, con retardo ideal y con aproximación de Padé: a) Orden 2. b) Orden 7. ....	21
Figura 3. Diagrama de bloques que incluye a los retardos, la estrategia de control y la función del sistema. Tomado de [1]. ....	22
Figura 4. Tiempo fijo de $T_{TX}$ .....	23
Figura 5. Tiempo fijo de $T_{RX}$ .....	23
Figura 6. Relación entre amortiguamientos y tiempos de retardo. Tomado de [45]. ..	24
Figura 7. Sistema de excitación tiristor con AVR y PSS. Tomado de [6]. ....	26
Figura 8. Diagrama de bloques para una sola máquina de la estrategia Delta - W implementada .....	31
Figura 9. Sistema de prueba Kundur .....	32
Figura 10. Diagrama de bloques del funcionamiento de la estrategia de control Delta-w con retardo .....	33
Figura 11. Potencia con retardo $T_d= 0.1$ .....	33
Figura 12. Angulo de los generadores con respecto a la maquina 4 .....	34
Figura 13. Tensiones en las unidades generadoras .....	34
Figura 14. Potencia con retardo $T_d= 0.2$ .....	35
Figura 15. Angulo de los generadores con respecto a la maquina 4 .....	35
Figura 16. Tensiones en las unidades generadoras .....	36
Figura 17. Potencia con retardo $T_d = 0.3$ .....	37
Figura 18. Angulo de los generadores con respecto a la maquina 4 .....	37
Figura 19. Tensiones en las unidades generador .....	38
Figura 20. Diagrama de bloques del funcionamiento de la estrategia de control Delta-w modificada multiárea con retardo .....	38
Figura 21. Potencia con retardo $T_d=0.1$ .....	39
Figura 22. Angulo de los generadores con respecto a la maquina 4 .....	39
Figura 23. Tensiones en las unidades generadoras .....	40
Figura 24. Potencia con retardo $T_d=0.2$ .....	41
Figura 25. Angulo de los generadores con respecto a la maquina 4 .....	41
Figura 26. Tensiones en las unidades generadoras .....	42
Figura 27. Potencia con retardo $T_d=0.6$ .....	43
Figura 28. Angulo de los generadores con respecto a la maquina 4 .....	44
Figura 29. Potencia con retardo $T_d=1.0$ .....	45
Figura 30. Angulo de los generadores con respecto a la maquina 4 .....	46
Figura 31. Tensiones en las unidades generadoras .....	46
Figura 32. Grafica de polos y ceros. ....	48
Figura 33. Grafica de polos y ceros. ....	49

Figura 34. Grafica de polos y ceros. ....50

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Planteamiento del problema

Un sistema de potencia es altamente no lineal (dado su gran número de componentes y el enorme número de relaciones entre ellos) y opera sujeto a cambios constantes en su entorno: variaciones de carga, salida de generadores y variación continua de parámetros claves de operación. Cuando el sistema de potencia es sujeto a una perturbación, la estabilidad del sistema de potencia depende de la condición inicial de operación y de la naturaleza de la perturbación, en este caso, la estabilidad se define como la característica de un sistema dinámico a volver a tener un comportamiento con variables acotadas aún después de haber sido perturbado [1]. La estabilidad puede entenderse también como la capacidad del sistema para recuperar un estado de operación en equilibrio manteniendo sus variables dentro de unos límites de operación luego de que el sistema ha sido sometido a una perturbación.

Las perturbaciones a las que se encuentra sujeto un sistema de potencia se clasifican en pequeñas y grandes perturbaciones. Las pequeñas perturbaciones ocurren en la forma de pequeños cambios de carga y las grandes perturbaciones pueden tener su origen en un corto circuito en una línea de transmisión o en la pérdida de un gran generador. Después de una perturbación algunos generadores y cargas pueden ser desconectados con el objeto de aislar elementos del sistema que fallaron [1, 2].

La clasificación de estabilidad en sistemas de potencia está basada en diferentes aspectos, como son;

- La naturaleza física del modo resultante de inestabilidad;
  - La estabilidad en el ángulo del rotor
  - La estabilidad de frecuencia
  - La estabilidad de voltaje.
  
- La magnitud de la perturbación considerada:
  - Pequeña perturbación

- Gran perturbación
- Los dispositivos, los procesos, y el lapso de tiempo que debe ser tomado en cuenta para evaluar la estabilidad.
  - Periodo corto
  - Periodo largo

Las diferentes áreas de estudio que los investigadores usan para tratar los temas de estabilidad son; la estabilidad de la tensión, de la frecuencia y del ángulo del rotor de la máquina.

La estabilidad de la tensión como área de estudio considera los modelos en estado estacionario de los dispositivos y analiza el comportamiento general del sistema cuando las tensiones se alejan descendientemente de los valores nominales. Por su parte, la estabilidad de frecuencia como área de estudio, considera los modelos dinámicos del sistema para analizar las variaciones y oscilaciones en las frecuencias que usualmente se presentan por desbalances de potencia entre generador-carga.

El tipo de estabilidad que estudiaremos es la estabilidad en el ángulo del rotor a pequeña perturbación. Este tipo de estabilidad se refiere a la capacidad que tiene una unidad generadora de un sistema de potencia para mantener el sincronismo después de ser sometida a una pequeña perturbación, asociada principalmente, con el insuficiente amortiguamiento de oscilaciones y se mide por la habilidad de dicha unidad de mantener o de restaurar el equilibrio entre el par electromagnético y el par mecánico. La inestabilidad se presenta en la forma de aumento de cambios angulares de algunos generadores llevándolos a la pérdida de sincronismo con otros generadores.

La naturaleza del problema de estabilidad en el ángulo del rotor puede ser local o global. La estabilidad de naturaleza local se refiere a las oscilaciones asociadas con el ángulo del rotor de una sola planta generadora contra el resto del sistema.

Nuestro nicho de investigación se encuentra dentro del estudio de los problemas de estabilidad de naturaleza global.

El problema global es causado por la interacción entre grandes grupos de generadores y produce efectos generalizados. Estos efectos involucran oscilaciones de un grupo de generadores en un área balanceada contra un grupo de generadores en otra área. Tales oscilaciones son llamadas modo de oscilaciones inter-área.

El problema particular que tratará este proyecto de grado puede presentarse como sigue: no se tiene plena claridad acerca de la manera en que el Power System Stabilizer mueve los polos y modifica la función característica de un sistema de potencia de área amplia con retardos y en el que se presentan oscilaciones Inter-Área.

## **1.2 Justificación**

Un primer aspecto que justifica la realización de éste proyecto es el de la necesidad de entender de mejor manera el comportamiento de los retardos, su simulación y la manera como éste influye en la inestabilidad de un sistema de control centralizado basado en WAMS (Wide Area Monitoring Systems).

Así mismo, la realización de éste proyecto es relevante ya que aportará elementos para la disminución del problema de la limitación en la transferencia de potencia entre áreas de un sistema cuando se presentan oscilaciones en ellas.

Por otro lado, el proyecto efectuará aportes en el análisis del comportamiento post-intervención basado en la sintonización de PSS's (Power System Stabilizers). En este caso, el Power systems stabilizer es un mecanismo que toma señales del sistema como velocidad o potencia y su salida es una señal suplementaria que llega al AVR (Automatic voltaje regulador) y que agrega componentes de amortiguamiento con el fin de mitigar los efectos oscilatorios. Frente a ésta situación se requiere profundizar debido a que no se cuenta con muchos estudios al respecto.

Otro aspecto importante que motiva la realización de este proyecto, es el de contribuir a la prevención de apagones debidos al mal amortiguamiento de oscilaciones. Lo anterior, dado que las oscilaciones exageradas ocasionan disparos

en las protecciones que pueden provocar la activación en cascada de varias protecciones adicionales.

Por otro lado, la propuesta se efectuará solamente a través de simulaciones. Aun así, tales simulaciones se harán en Matlab considerando que es posible representar de forma muy cercana lo que sucedería en un sistema real con sus correspondientes soluciones.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Generales**

Analizar las variaciones en la función característica de pequeña señal de un sistema de potencia con retardos y controlado por PSS's.

### **1.3.2 Específicos**

- Documentar y poner a disposición del grupo de investigación referencias bibliográficas sobre la estabilidad de los sistemas de potencia con retardo en sus canales de comunicación.
- Construir un modelo del retardo en canales de comunicación cuando se integra a las simulaciones de sistemas de potencia en los que existen varias áreas coherentes (Áreas amplias).
- Implementar un modelo total del sistema de área amplia con retardo incluyendo los controles PSS's.
- Documentar los resultados de la forma en que influyen los PSS en el desempeño total del sistema de área amplia con retardos y efectuar una comparación con la metodología de análisis espectral para la ubicación de los polos.

## 1.4 Estado del arte

Actualmente, los sistemas de potencia trabajan cerca de su nivel máximo; bajo estas condiciones, puede tener lugar problemas de estabilidad, confiabilidad y seguridad [3].

Los grandes sistemas de potencia no solo tienen que lidiar con las oscilaciones locales (presentes en pequeños sistemas de potencia), si no también con las oscilaciones inter área que afectan principalmente flujos de potencia en líneas principales [4, 5, 6, 7]. Tal es el caso de sistemas de potencia con líneas principales sobrecargadas en las que la aparición de fenómenos inter-área podría provocar eventos en cascada y apagones cuando ocurren fuertes disturbios [1, 2, 8], esto ha sido categorizado como falla de seguridad del sistema de control de procesos haciendo evidente la necesidad de una sólida capacidad de toma de decisiones autónoma con el objetivo de sentar las bases de las redes inteligentes de transmisión [9].

Los reguladores automáticos de voltaje AVR's y los estabilizadores del sistema de potencia PSS's han sido empleados exitosamente para tratar con la rápida dinámica asociada a fenómenos de oscilaciones locales [1, 2, 10]. La amortiguación de oscilaciones inter-área requiere controladores de alimentación remota con señales medidas por WAMS (Sistemas de Monitoreo de Área Amplia) [8, 9, 10, 11] que a su vez básicamente son construidos con unidades de medición fasorial PMU's (Phasor Measurement Units) y esquemas de comunicación complejos. Aunque estas mejoras en el comportamiento de las oscilaciones inter-área han sido efectivas surge un nuevo desafío; alcanzar la estabilidad con un control de lazo cerrado a pesar de los retardos debidos a las mediciones tomadas lejos del centro de control [10]. De forma resumida, la señal viaja de cada posible fuente de medición siguiendo la ruta WAMS: PMU – PDC (Phasor Data Concentrator) – SPDC (Super-Phasor Data Concentrator) – centro de control [12, 13], incluyendo los correspondientes cables o canales inalámbricos. Además del retardo inherente al procedimiento de realimentación, retardos adicionales se agregan a la señal de transmisión debido a interrupciones, re-enrutamiento y congestión en el contexto de contingencias cibernéticas en la capa de comunicación [14]. Esto es, los efectos desestabilizadores subsecuentes en el control de lazo cerrado derivados de los

problemas antes mencionados son un desafío importante en los grandes sistemas de potencia y han aumentado la concientización de los investigadores [3, 4, 15, 16]. La investigación fue motivada por la necesidad de modernizar los sistemas de potencia capaces de hacer frente a las dificultades de control en los WAMS (Sistemas de Monitoreo de Área Amplia) centralizados para amortiguar las oscilaciones inter-área causadas por retardos en el sistema de comunicación.

Varias técnicas no lineales prometedoras han establecido el camino para el control de sistemas de potencia [17]. Por ejemplo, el backstepping ha sido usado para seguir los cambios de referencia de potencia [18, 19], la linealización de retroalimentación permitió que el diseño de los controladores de circuito cerrado manejara una alta no linealidad [20, 21] y pasividad. Por otro lado, un trabajo reciente propone controladores de realimentación de estado dinámico que ajustan sus modelos por medio de esfuerzos matemáticos significativos para considerar no linealidades debido a saturaciones [23].

Para manejar los problemas de retardo en los sistemas de potencia han sido propuestos dos enfoques principales: Problemas de retardo que se gestionan exclusivamente con controladores robustos o problemas de retardo que se gestionan con una combinación de controladores adicional a compensadores de retardo [24].

En el caso de los controladores robustos, estos se basan generalmente en desigualdades lineales matriciales (LMI), normas de H infinito, modelos ANN (Artificial Neural Networks) [16, 25, 26, 27]; con buenos resultados reflejados en el hardware-in-the-loop (HIL) logrando mejora de la estabilidad en los sistemas de potencia con retardos cercanos a los 350 [21]. Por otro lado, algunos investigadores han propuesto una compensación basada en lógica difusa, Redes neuronales artificiales ANN, cálculos matemáticos y predictor Smith. Estas estrategias han mostrado resultados modestos cuando los tiempos de retardo son menores a 100 ms [28, 29, 30, 31]. Todas estas estrategias presentan resultados cuantitativos y analizan fundamentalmente la salida de las señales, y como se menciona, presentan muy buenos resultados.

Aún con el avance en la implementación de los controladores para disminuir las oscilaciones debidas a retardos en sistemas de potencia, los estudios sobre los movimientos de los polos dominantes son escasos. De forma limitada, Milano y Vanfretti ofrecen estudios cualitativos sobre el comportamiento del sistema frente a la inclusión de los retardos, pero no indican sus variaciones al vincular nuevos controladores [15, 23]. Es decir, aquí se tiene un espacio donde se puede efectuar una contribución investigativa.

## **2. FORMULACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA**

En esta sección se va a describir un modelo general del sistema de potencia que se utilizará como referente para encontrar las soluciones del problema del control del retardo de un sistema de potencia. Se realizará la formulación del problema teniendo en cuenta modelos que permiten un enfoque no lineal global. Dentro de las características que debe tener un modelo que facilite un acercamiento a los sistemas de potencia con retardo destacamos la inclusión de los retardos en las comunicaciones, las complejidades de las propiedades No-lineales y los problemas de interacción entre los controladores locales y los controladores de área amplia.

### **2.1 Elementos principales de un sistema de potencia**

La importancia de un sistema de potencia radica en su disposición para llevar energía eléctrica a usuarios finales con diferentes objetivos como pueden ser económicos o sociales. El aumento de la población se convierte en un factor determinante que incentiva el crecimiento de la infraestructura eléctrica y plantea retos en el área de la generación, de las redes de transmisión y otros elementos eléctricos desde el punto de vista de su característica No-lineal.

Existe abundante bibliografía relacionada con la descripción de estos elementos.

A continuación se realizará una descripción general de cada uno de ellos con el objeto de mostrar la naturaleza No-lineal de un sistema de potencia.

### 2.1.1 Unidad de generación

En un sistema de potencia las unidades de generación son las encargadas de suministrar energía a la red, son las fuentes de poder y por lo tanto, comprenden el primer elemento en la infraestructura encargada del proceso de poner a disposición de los usuarios finales la electricidad, aun hoy, que se tienen posibilidades de generación distribuida.

Las unidades de generación, que son máquinas síncronas, existen de dos tipos; de rotor redondo y de polos salientes. Ambos tipos de máquinas poseen dinámicas diferentes. Los dos tipos de máquinas obedecen a un principio de funcionamiento similar el cual consiste en la transformación de energía mecánica en energía eléctrica mediante inducción electromagnética llevada a cabo por la interacción de los devanados del rotor y el estator.

Las velocidad de rotación del rotor es regulada por el gobernador y su función es la de mantener constante la velocidad de la máquina. Por otro lado, la velocidad del campo magnético es regulada por la excitatriz y ésta debe tener la capacidad de regular el voltaje de alimentación del rotor. Para monitorear el voltaje de entrada y el voltaje de salida se utiliza el AVR. El modelado de la excitatriz y el AVR muestra no linealidades asociadas a los dispositivos eléctricos.

Los AVR funcionan bien en estado estable, pero bajo los efectos de las perturbaciones, es decir en estado transitorio, no son suficientes para mantener la referencia del voltaje. Por esta razón se hace necesario introducir los PSS's, los cuales contribuyen al mejoramiento del comportamiento del sistema bajo condiciones transitorias. Como resultado, el modelo de la unidad generadora se ve afectado por la introducción de un elemento No-lineal adicional.

El modelo más simplificado de la unidad generadora es la ecuación de swing representada en la ecuación 1.

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{M}(P_m - P_e - D\Delta\omega) \\ \dot{\delta} &= \Delta\omega\end{aligned}\tag{1}$$

Donde  $P_m$  es constante and  $P_e$  es No-lineal respecto a  $\delta$ .  $M$  representa la inercia del rotor y la turbina,  $D$  la componente de amortiguación y  $\delta$ -  $\omega$  las variables de estado, ángulo y velocidad.

### 2.1.2 Redes de transmisión

Para disponer de la energía en los centros de consumo teniendo en cuenta que las principales unidades de generación se encuentran a gran distancia, es necesario contar con una infraestructura que permita hacerlo de una forma segura, esto son, transformadores, dispositivos de estado sólido y redes de transmisión.

El objeto de la red de transmisión es suministrar un medio físico para garantizar la equipotencialidad del voltaje desde la unidad de generación hasta el usuario final.

El modelo físico de la red de transmisión muestra una relación matemática entre voltajes y corrientes. El modelo está conformado principalmente por capacitores, inductancias y resistencias. En el caso del transformador, su modelo es muy similar al de las redes de transmisión y se representa como una red de transmisión entre dos nodos.

La ecuación;

$$I_B = Y_B V_B \quad (2)$$

Proporciona la relación entre Corrientes y voltajes de la red.

Y las ecuaciones;

$$\begin{aligned} P_i &= V_i^2 G_{ii} + \sum_{\forall j \neq i} V_i V_j [B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \\ Q_i &= -V_i^2 B_{ii} + \sum_{\forall j \neq i} V_i V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \end{aligned} \quad (3)$$

Denominadas ecuaciones de balance de potencia, representan las relaciones no lineales de las potencias activa y reactiva con las principales variables eléctricas.

### 2.1.3 Modelos de carga

En un sistema de potencia, el modelo de carga constituye una representación matemática que relaciona la potencia activa y la potencia reactiva con el voltaje y la frecuencia de la carga conectada a un nodo.

Los modelos de carga deben tener la propiedad de representar la mayoría de los tipos de carga. En este sentido, se identifican dos tipos de modelos de carga; modelos de carga estáticos y modelos de carga dinámicos.

Los modelos de carga estáticos son menos complejos y pueden representar distintos tipos de cargas. Por otro lado, los modelos de carga dinámicos se utilizan para casos más particulares y son más rigurosos y complejos.

En el caso del modelo de carga estático, este permite calcular la potencia activa y la potencia reactiva a través de ecuaciones algebraicas las cuales se encuentran en términos del voltaje y la frecuencia. Existen dos modelos estáticos muy utilizados, el modelo exponencial y el modelo ZIP. De estos dos modelos, el modelo ZIP proporciona más información para diferentes tipos de carga conectadas en un mismo nodo y su modelo es una expresión polinomial.

Por otro lado, cuando se tienen en cuenta los cambios que la frecuencia efectúa en la carga estos deben ser tenidos en cuenta para los análisis dinámicos los cuales son de importancia en los estudios de estabilidad de voltaje. En este caso el modelo que se obtiene es No-lineal;

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left[ a_z \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + a_l \left( \frac{V}{V_0} \right)^1 + a_p \left( \frac{V}{V_0} \right)^0 \right] \\ Q &= Q_0 \left[ b_z \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + b_l \left( \frac{V}{V_0} \right)^1 + b_p \left( \frac{V}{V_0} \right)^0 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Las constantes  $a_i$ ,  $b_i$ , relacionan  $P$  y  $Q$  con el modelo ZIP.

Para el objeto de este trabajo, el sistema de potencia corresponde a una red interconectada con generadores, cargas y otros dispositivos conectados a los nodos, los cuales implican un aumento de no linealidades y variables de estado.

## 2.2 El modelo no lineal general

Como se ha descrito, el comportamiento de los diferentes elementos que conforman un sistema de potencia es No-lineal. El modelamiento de la unidad de generación, de las ecuaciones de flujo de potencia y de la carga muestra relaciones caracterizadas por la No-linealidad, diferenciabilidad en el tiempo y naturaleza trigonométrica [2, 32]. En este sentido, la ecuación 5 describe de forma general el comportamiento dinámico del sistema de potencia después de reemplazar las variables algebraicas descritas en las ecuaciones 2 y 3 obtenidas por el flujo de potencia, con la ecuación 4. La ecuación 5 es un modelo de lazo abierto. Para el objeto de este trabajo, las variables de entrada son las señales complementarias y las variables de salida son los flujos de potencia en las líneas de enlace de mayor importancia. Una característica adicional de este modelo es su gran cantidad de variables; es decir, las ecuaciones de las unidades síncronas se consideran en forma extendida así como los elementos pasivos de las cargas, redes de transmisión, derivaciones en paralelo y elementos serie [33].

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= h(x(t))\end{aligned}\tag{5}$$

$X(t)$  Representa las variables de estado dinámico;  $u(t)$ , las señales de entrada;  $y(t)$ , las señales de salida;  $f(\cdot)$  y  $h(\cdot)$  son funciones no lineales [34, 2, 35, 32]. Para la ecuación 5, la evolución del tiempo es  $\phi(t)$  con  $x_0 = x(0)$ , y una secuencia de control para el intervalo  $[0, t]$  dada por  $U(t)$ .

$$\phi(t) = \phi(x_0, U(t))\tag{6}$$

De otro lado; la demanda, la generación, así como las redes de transmisión, están sujetas a contingencias que pueden introducir algunas variaciones en la ecuación 5

las cuales son introducidas como incertidumbres y se denotan como  $w(t)$  en la ecuación 7, [35, 36].

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), w(t)) \\ y(t) &= h(x(t))\end{aligned}\tag{7}$$

El sistema representado en la ecuación 7 permite estudiar oscilaciones entre áreas y problemas de estabilidad que serán importantes para este trabajo. Para lo anterior se realizarán un supuesto importante: el sistema de potencia es observable y controlable [37, 38]; debido a esto, el sistema de potencia puede ser manejado por una ley de control  $u(t)$  adecuada para cumplir los requisitos de estabilidad. En este sentido, en comparación con las leyes de control de lazo abierto y las estrategias de lazo cerrado, el control de retroalimentación ha demostrado ser mucho mejor [4, 1, 2, 39]. El control de retroalimentación obtiene constantemente errores para corregir la acción de control, y esta característica ofrece más capacidades para enfrentar incertidumbres; Adicionalmente, es menos sensible a los cambios en los parámetros. Por lo anterior, se hace una nueva suposición sólida y establece la ruta de soluciones para el problema de control del sistema de potencia: es posible encontrar una ley de control de lazo cerrado adecuada que pueda ser alimentada por los estados del sistema de potencia. Todo esto se puede lograr debido a la existencia de observabilidad que se mencionó. Por lo tanto, se introduce una ley de control no lineal  $u(t) = \gamma(x(t))$  en el sistema de potencia. Lo anterior convierte la ecuación 7 al siguiente sistema;

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), \gamma(x(t)), w(t)) \\ y(t) &= h(x(t))\end{aligned}\tag{8}$$

Donde  $\gamma(\cdot)$  representa una posible ley de control de lazo cerrado que se utilizará en el sistema de potencia. El objetivo principal de la etapa de diseño de control es encontrar una ley de control adecuada alimentada por los estados dinámicos  $x(t)$  con el objetivo de amortiguar las oscilaciones entre áreas en la ecuación 7.

En este punto, de acuerdo con la naturaleza de los sistemas de potencia, se ha llegado a la ecuación de un modelo general de lazo cerrado no lineal a gran escala con incertidumbres, ecuación 8, [40, 41, 42, 43]. Este es un panorama general de la dinámica de los sistemas de potencia que se debe tener en cuenta para hacer claridad sobre los impactos de los retrasos en la dinámica de los sistemas, y por lo tanto, es la base de la hipótesis sobre las soluciones. Actualmente esto constituye un problema complejo en el campo de la teoría de sistemas de control [3, 4].

### 2.3 Tiempo de retardo en el canal de realimentación

Las acciones de control se calculan utilizando la información del sistema transmitida mediante la infraestructura de comunicación. Por lo tanto, la información llega al centro de control con un tiempo de retardo. Por lo tanto, la ley de control basada en los estados dinámicos toma la forma;

$$u(t) = \gamma(x(t - \tau_d)) \quad (9)$$

Esto se debe a la suposición relacionada con la ley de control de lazo cerrado existente para el sistema en la ecuación 7. Esto es, la ley de control de lazo cerrado presenta un problema debido a que se deriva de la dinámica en la ecuación 7 pero se encuentra alimentado por señales retardadas.

La mayoría de los investigadores consideran el retardo como una cantidad constante; sin embargo, su comportamiento es el que se muestra en la ecuación 9, que a su vez puede convertirse en la ecuación;

$$u(t) = \gamma(x(t - \mathcal{N}(\mu_G, \sigma_G))) \quad (10)$$

La ecuación 10 se construye asumiendo el mismo valor para el tiempo de retardo en todos los canales.

A pesar de que los autores de dichos estudios de investigación describen los efectos desestabilizadores de los retardos en los sistemas de potencia, no establecen tiempos de retardo seguros como lo hizo Manfred en [44]. Esto es

importante porque la investigación define una región estable para los polos del sistema afectados por retardos. La principal conclusión del informe es la siguiente: se debe ignorar las incertidumbres  $w(t)$  alrededor del punto de equilibrio, y para la representación linealizada del sistema dinámico en la ecuación 7 afectados por los tiempos de retardo con un valor de  $\tau$ , hay una región para los polos del sistema en el lado izquierdo del plano imaginario en el que el retardo no crea problemas. Esta región cambia su forma de acuerdo con el valor de  $\tau$ .

De forma general, dos conclusiones principales se derivan de [44]; Primero: habrá sistemas en los cuales los polos están en la región y no se ven afectados por los retardos de tiempo, es compacto y convexo; segundo: la región inestable es obviamente mayor que la región estable. Además, se notará que la región estable aumenta su tamaño con la inverso de  $\tau$ ; es decir, un sistema funciona más seguro para valores pequeños de tiempos de retardo en lazo cerrado. Por el contrario, si el valor de  $\tau$  es lo suficientemente alto, podría desestabilizar incluso un sistema muy estable debido a la disminución de la región estable. Incluso, con una compensación de tiempo, una reducción en el tiempo de retardo contribuye a la estabilización del sistema de lazo cerrado con retardo.

## 2.4 Modelamiento del retardo usando PADE

Las dificultades que se tienen con la implementación del retardo ideal mediante la exponencial en el dominio de la frecuencia radican en que tienen un alto costo computacional y en algunos casos tal función no puede implementarse. Ahora, para solucionar el problema se usa una aproximación racional-polinomial de Padé que permite transformar la exponencial y evitar aquella dificultad de implementación [27]. En esta aproximación Padé, el orden del denominador es igual al orden del numerador y define el orden de la aproximación, como se ve en la ecuación 11.

$$R(s) = \frac{p_0 + p_1s + p_2s^2 + \dots + p_ms^m}{1 + q_1s + q_2s^2 + \dots + q_ns^n} \quad (11)$$

En la figura 1 se ilustra el retraso ideal y la aproximación polinomial de Padé, para el caso de orden 2 y para el caso de diferentes órdenes.

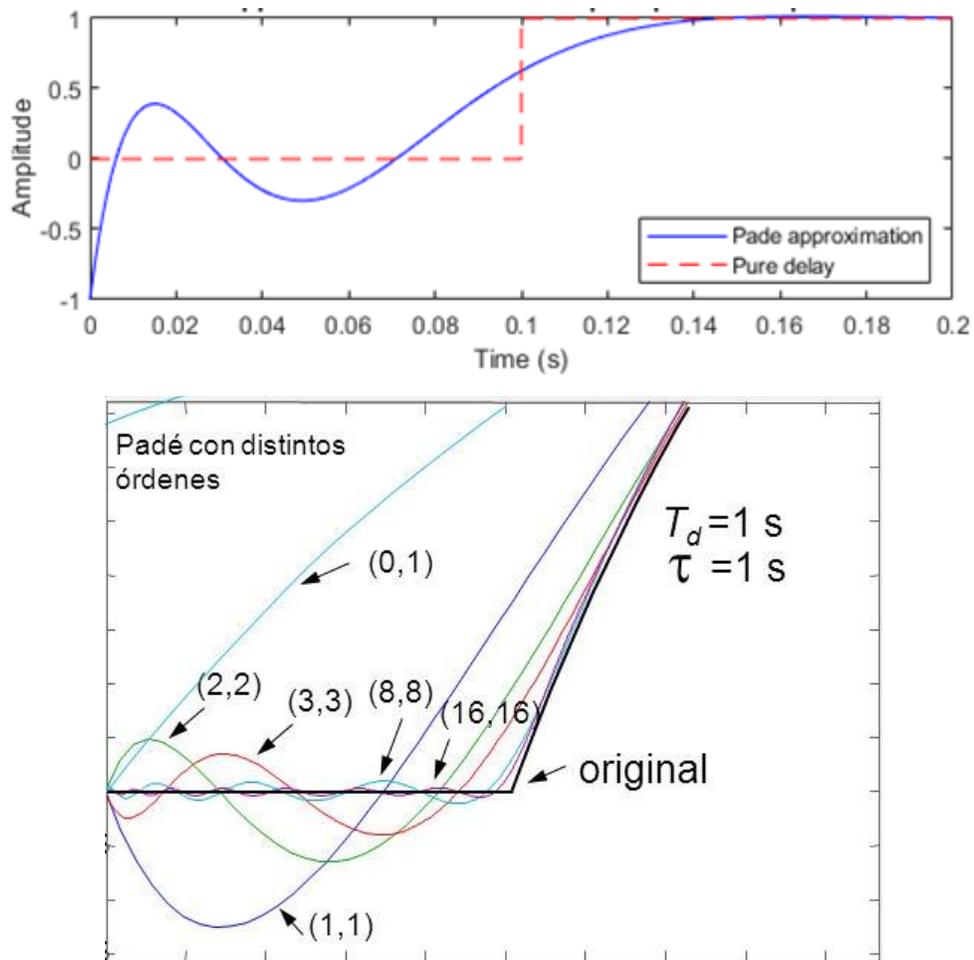


Figura 1. Gráfico comparativo en el tiempo de la aproximación de Padé y el retardo ideal a) Orden 2. b) diferentes órdenes.

Del gráfico puede notarse que una aproximación polinomial de orden 2 tiene una diferencia notable con respecto del retardo que puede presentarse debido a la transmisión de la señal. La mejor representación del retardo es aquella modelada con la exponencial en el dominio de la frecuencia. Ahora, para mejorar la representación se construye una aproximación de Padé de mayor orden pero aquí puede notarse que siguen existiendo diferencias entre la señal polinomial y lo que se quiere modelar. La aproximación de Padé sugiere que para poder efectuar una representación fiel se requiere que el orden de la función racional sea infinito. Aquí, podría decirse que la aproximación sugerida puede generar más inconvenientes que el problema original. Sin embargo, se planteó una simulación del sistema de orden

11 de forma que se pudiera evaluar el desempeño de la aproximación de Padé en sus distintos grados.

En la figura 2 se muestra la implementación: en línea continua está el sistema original sin retardos; en asteriscos se muestra el retardo ideal al interior de la simulación; en círculos se presentan las respuestas cuando se ha implementado el retardo usando la aproximación de Padé. La figura 2a presenta la respuesta del sistema con retardos mediante aproximación de orden 1. Nótese que existen diferencias entre la aproximación del retardo de tipo exponencial y la aproximación efectuada de forma polinomial de Padé, son evidentes las diferencias.

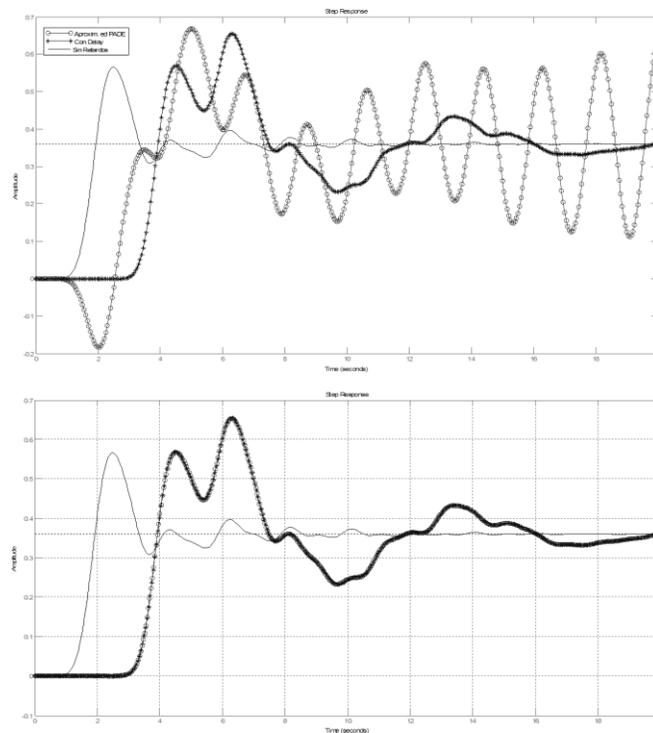


Figura 2. Imagen comparativa de las respuestas sin retardo, con retardo ideal y con aproximación de Padé: a) Orden 2. b) Orden 7.

La figura 2b hace evidente que una aproximación de Padé de orden 7 coincide con la representación del retardo que se efectúa de forma exponencial. Como conclusión, para éste caso específico, es posible comentar que una aproximación de Padé de orden 7 permite reproducir muy bien el retardo que puede suceder en los sistemas de comunicaciones para montaje de WAMCS (Wide área Measurement

Control System). Ya con esto como base se procede a la implementación de los WAMCS que incluyan el retardo y así se podrán revisar las implicaciones.

## 2.5 Simulación de los efectos desestabilizadores del retardo en un sistema de potencia

Una vez se cuenta con un modelo plausible de los retardos, se construye un modelo en diagramas de bloques que permite tener la relación matemática entre el valor del retardo y la ubicación de las raíces del polinomio característico. En la figura 3 se observa la inclusión de los retardos junto con la función de transferencia del sistema y la constante de control.

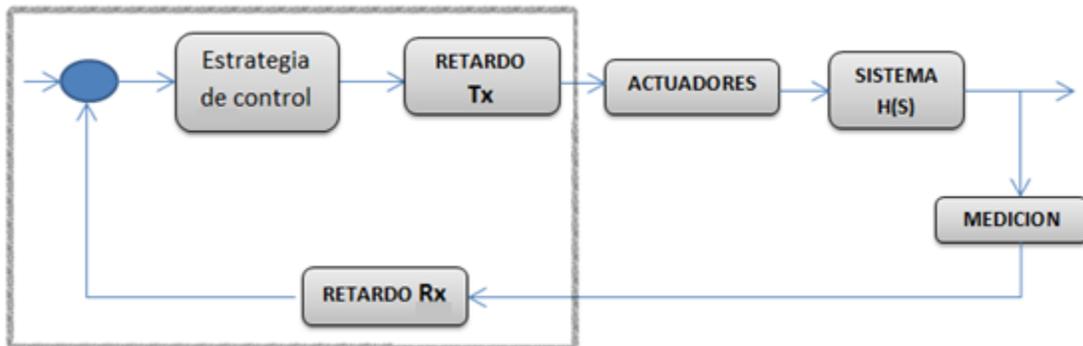


Figura 3. Diagrama de bloques que incluye a los retardos, la estrategia de control y la función del sistema. Tomado de [1].

A partir del anterior diagrama de bloques se logra obtener una función de transferencia en lazo cerrado que se muestra en la ecuación 11.

$$H_{lc}(s) = \frac{N(s)H(s)e^{-T_{Rx}S}}{N(s)H(s) + e^{-(T_{Rx} + T_{Tx})S}} \quad (12)$$

En la ecuación 11 se hace evidente que el denominador, polinomio característico, es influenciado por la presencia de los retardos tanto de las señales enviadas hacia el centro del control como las que tal centro de control envía hacia los equipos. Por tanto, es de esperarse que la variación de estos valores afecte el valor de amortiguamiento en los sistemas eléctricos en su conjunto y deterioren, por supuesto, el funcionamiento de los WAMPAC's.

Como parte del estudio se implementó la función de transferencia del sistema de grado 11 para revisar las implicaciones de la variación de los tiempos de retardos. En primera medida se mantuvo fijo el tiempo de transmisión de la señal de control -  $T_{TX}$  - en 0.9 segundos, considerando esto, se efectuaron variaciones en los tiempos de transmisión de las señales de medida desde un valor de 0.8 segundos hasta los 3 segundos. En la figura 4 se ilustran los resultados. Por otro lado, se realizó el análisis considerando fijos los tiempos de las señales de recepción de las medidas -  $T_{RX}$  -, así se revisaron los resultados variando los tiempos de transmisión que se ilustra en la figura 5.

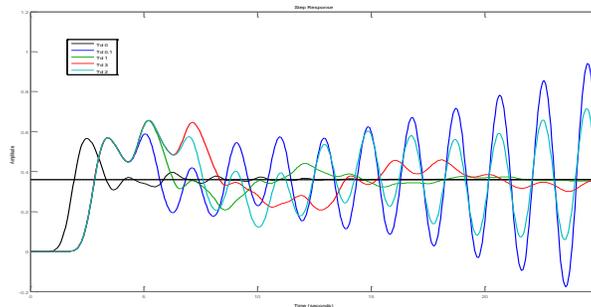


Figura 4. Tiempo fijo de  $T_{TX}$ .

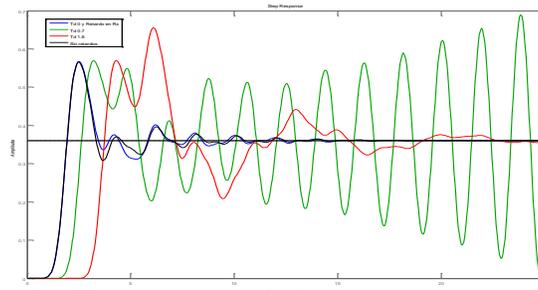


Figura 5. Tiempo fijo de  $T_{RX}$ .

En las dos figuras puede notarse que los tiempos de los retardos, tanto para las señales de control como para las señales de medición, pueden afectar el amortiguamiento del sistema frente a variaciones de la señal de referencia. Así mismo se nota que no existe una linealidad entre tiempos de retardo y amortiguamiento; un ejemplo de esto es que en los dos casos, partiendo de un tiempo de retardo pequeño, el incremento del mismo no implica un detrimento del amortiguamiento. De forma equivocada se ha considerado que la disminución de los tiempos de retardo provoca mejores respuestas, sin embargo, puede notarse que tal

conclusión resulta errada para el caso del sistema bajo estudio. Lo que estamos describiendo es corroborado al presentar los resultados del trabajo [45].

Como se menciona, los resultados presentados coinciden con lo sugerido por Venayagomoorthy *et al* [2] en el sentido que considerando retardos de 0.5 s para las oscilaciones intra-área 1, es posible encontrar un amortiguamiento 0.27 pero al disminuir tal tiempo de retardo a 0.25 s éste amortiguamiento se reduce hasta cerca de 0.1.

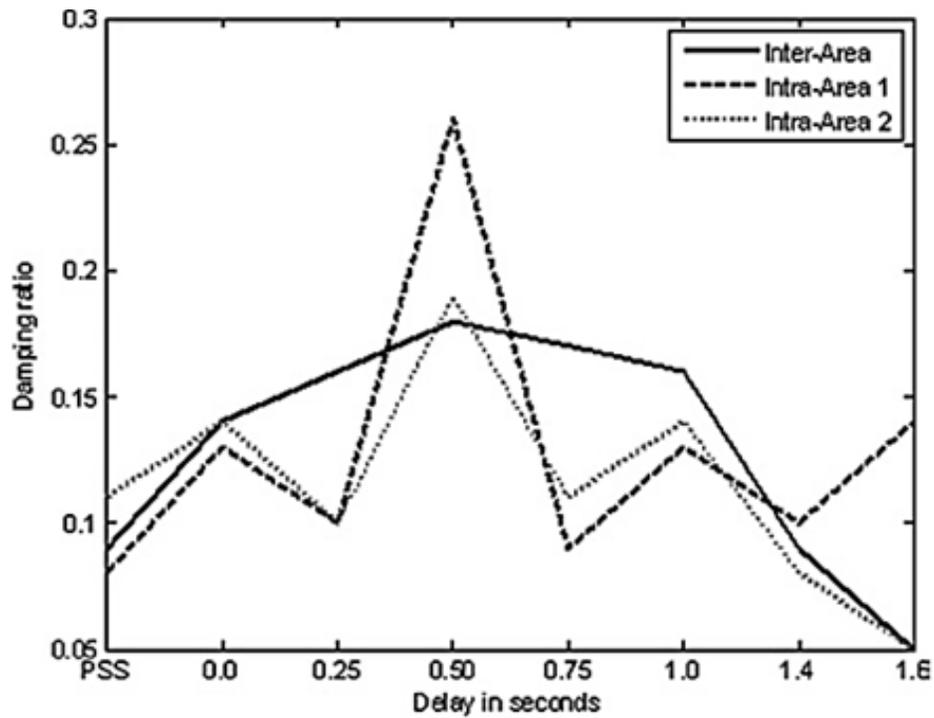


Figura 6. Relación entre amortiguamientos y tiempos de retardo. Tomado de [45].

### 3. PROPUESTA DE CONTROL Y ANÁLISIS CUALITATIVO

#### 3.1 PSS's. Funcionamiento de los PSS's.

El PSS's es un mecanismo que toma señales del sistema como velocidad o potencia y su salida es una señal suplementaria que llega al AVR y que agrega componentes de amortiguamiento para mitigar los efectos oscilatorios.

El PSS es utilizado como control suplementario al sistema de excitación con el objeto de amortiguar los efectos de las oscilaciones que afectan el sistema cuando se presentan perturbaciones.

La función básica del estabilizador es la de ampliar los límites de estabilidad de la máquina mediante un proceso de modulación de la excitación que busca amortiguar las oscilaciones de los rotores de las máquinas síncronas. Para lograr el efecto de amortiguamiento, el estabilizador debe producir un componente del par eléctrico en el rotor en fase con las variaciones de velocidad, de esta manera, aumenta la amortiguación del sistema.

Los PSS's tienen los siguientes principios de funcionamiento:

- Utiliza una señal estabilizadora auxiliar para controlar la excitación. La señal más lógica es  $\Delta\omega$ .
- Si las funciones de transferencia del excitador y el generador fueran ganancias puras, la retroalimentación directa de  $\Delta\omega$  resultaría en un par de amortiguación.
- En la práctica, el generador y posiblemente el excitador exhiben características de ganancia y fase dependientes de la frecuencia. La compensación de fase da como resultado un componente de par de amortiguación puro.
- La compensación de fase exacta da como resultado un componente de par de amortiguación puro, de esta manera una compensación excesiva introduce un componente de par de sincronización negativa y una

compensación baja introduce un componente de par de sincronización positiva.

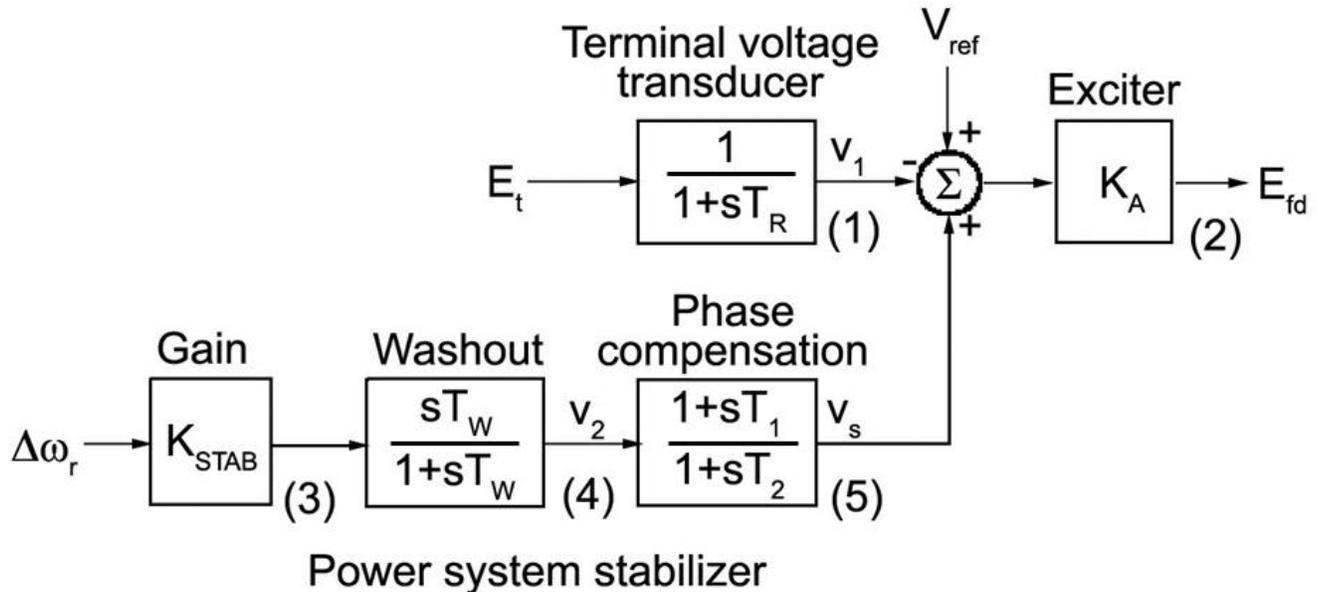


Figura 7. Sistema de excitación tiristor con AVR y PSS. Tomado de [6].

En términos generales, el problema de estabilidad de la señal se refleja en una amortiguación insuficiente de las oscilaciones del sistema, para esta situación, los estabilizadores del sistema de energía (PSS's), son los medios más rentables para resolver estos problemas. El propósito es agregar amortiguación a las oscilaciones del rotor del generador. Como ya se mencionó, esto se logra modulando la excitación del generador para desarrollar un componente de par eléctrico en fase con desviaciones de velocidad del rotor. Las señales de entrada comunes incluyen: velocidad del eje, potencia y frecuencia del generador.

El tipo de estabilizador que se toma como referencia en este trabajo es el estabilizador delta  $-w$  ya que es el control clásico planteado en el Kundur, esto con el ánimo de facilitar el análisis comparativo de los PSS's y sus efectos en los sistemas de potencia.

### 3.1.1 Estabilizador Delta-Omega:

Este tipo de estabilizador es basado en la señal de velocidad del eje. Dentro de sus características, dependiendo del tipo de unidad generadora, podemos mencionar las siguientes:

Para unidades hidráulicas:

- Se utiliza con éxito desde 1960
- Requiere minimización de ruido
- Las salidas de velocidad se suman desde varias ubicaciones en el eje

Para unidades térmicas:

- El estabilizador puede causar inestabilidad de las oscilaciones torsionales.
- La velocidad debe ser detectada en los nodos de los modos torsionales; requiere filtros torsionales

Dentro de las desventajas que podemos encontrar en el estabilizador delta-omega se encuentran:

- Se necesita limador torsional. Esto puede introducir un desfase en las frecuencias más bajas y desestabilizar el modo de excitación.
- impone límite máximo en la ganancia del estabilizador
- Se requiere un diseño personalizado para cada unidad para lidiar con los modos de torsión.

El sistema de control básico del estabilizador delta-omega es el siguiente:

$$H_{pss} = \frac{K_S * T_w (T_1 * S + 1)}{(T_w * S + 1)(T_2 * S + 1)} \quad (13)$$

## 3.2 Propuesta de Control global del sistema de potencia usando señales remotas con retardos

En ésta sección se habla de una nueva propuesta de control de sistemas de potencia que tiene en cuenta el efecto catastrófico de los retardos. La propuesta actúa sobre un sistema de potencia con retardos de tiempo en las comunicaciones, y evita la inestabilidad aún en condiciones de fallas. Así, la propuesta presentada es una especie de control robusto frente a retardos y perturbaciones. Se describe a continuación la metodología:

Cuando hablamos de un problema relacionado con un sistema de potencia nos referimos a un modelo lineal nominal como el de la ecuación 13;

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + BK_d y(t - \tau_d) \quad (14)$$

Donde;

$$y(t) = Cx(t)$$

El cual puede representar un punto del espacio n-dimensional.

A la luz de este concepto podríamos inferir que las perturbaciones e incertidumbres comparten la misma zona dentro de este espacio n-dimensional, es decir, el modelo perturbado por las variaciones paramétricas y el modelo perturbado por el retardo se encuentran dentro de esta misma zona, denominada bola n-dimensional.

Por otro lado, el tipo de control con la habilidad de manejar el problema nominal y los problemas en la vecindad de este punto nominal es conocido como control robusto. En este sentido, nos referimos a un control robusto para los sistemas de potencia con la habilidad de no dejarse afectar por las oscilaciones inter-área incluso con retardos en el sistema de monitoreo.

El tipo de control que estamos describiendo utiliza la realimentación de las señales de potencia y de velocidad. El factor, denominado matriz de realimentación, es determinado a partir de las siguientes reglas:

- 1) Cada una de las maquinas generadoras cuenta con una PMU y un AVR.

- 2) El sistema cuenta con un controlador central encargado de gestionar las mediciones realizadas en cada máquina generadora.
- 3) El retardo es el tiempo total de retardo y comprende el instante desde que se toma la señal hasta que regresa la señal de control que actúa sobre la maquina generadora [46]. Este retardo se encuentra en el rango de 100 a 400 milisegundos, sin embargo, permanece constante durante la simulación.

Como ya se mencionó, para el desarrollo de este trabajo se utilizará la metodología de control denominada  $\Delta\omega$  (Delta w) [34, 2, 47], pero realizando algunos cambios en ella que permitan trabajar con señales remotas. La metodología  $\Delta\omega$  realiza mediciones a las variaciones de velocidad de las maquinas generadoras, estas mediciones luego son enviadas al PSS que a su vez devuelve una señal de control al AVR [34]. La adaptación de la metodología para el trabajo con señales remotas tiene como objeto poder trabajar con las mediciones de área amplia WAMS [48, 49].

La metodología  $\Delta\omega$  con las adaptaciones propuestas en este trabajo sigue la siguiente secuencia. El concentrador central recibe todas las señales medidas utilizando el sistema WAMS, luego, calcula una señal que a su vez alimenta los PSS en cada máquina.

Para poder obtener cada una de las medidas registradas por el sistema WAMS se pondera o se sanciona con el objeto de que al final la señal obtenida sea la representación de una suma ponderada que tiene en cuenta información de todo el sistema de potencia. La señal obtenida se denomina señal ponderada del PSS y se calcula con la siguiente ecuación;

$$PSS_j = \sum_{\forall i}(k_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \Delta w_i) \quad (15)$$

Donde;

$\Delta w_i$  : simboliza la desviación de la velocidad.

$k_{ij}$  : simboliza el valor de ponderación también llamada constante de participación.

$l_{ij}$  : es un factor de acople entre la señal de la medición realizada en la máquina i y el PSS en la máquina j.

El índice  $l_{ij}$  toma el valor de -1 o 1.

La ponderación que se realiza debe cumplir que la suma de los valores de  $k_{ij}$  sea uno, es decir

$$\sum_{\forall i} k_{ij} = 1 \quad (16)$$

El procedimiento para escoger los valores de  $k_i$  y de  $l_{ij}$  es el siguiente:

- 1) Los valores deben estar entre cero y uno,
- 2) Las constantes de participación se observan en la figura 9 como,  $K_p$ ,  $K_a$ ,  $K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ . Los valores de estas constantes fueron seleccionados con base en algunos valores usados en [15]. El criterio indica que los valores de  $k_{ij}$  deben ser mayores que 0.6 y en caso de que  $i = j$  debe ser menores que 0.8, el objeto de este criterio es garantizar que la mayor afectación sobre la máquina  $j$  sea la misma máquina  $j$ .

Las señales que corresponden a los generadores diferentes al área de estudio son  $K_{d1}$  y  $K_{d2}$ . Se implementa además un sumador para obtener el resultado de todas las señales multiplicadas por sus respectivos valores de participación. La señal obtenida llega al PSS delta-w, y por último, la señal resultante ingresa en la máquina, para luego tomar acciones sobre ésta con el objeto de reducir los impactos de una perturbación.

Los valores recomendados y que fueron asignados para las constantes de participación son:

$$K_p=0.7$$

$$K_a=0.3$$

$$K_{d1}=-0.3$$

$$K_{d2}=-0.3$$

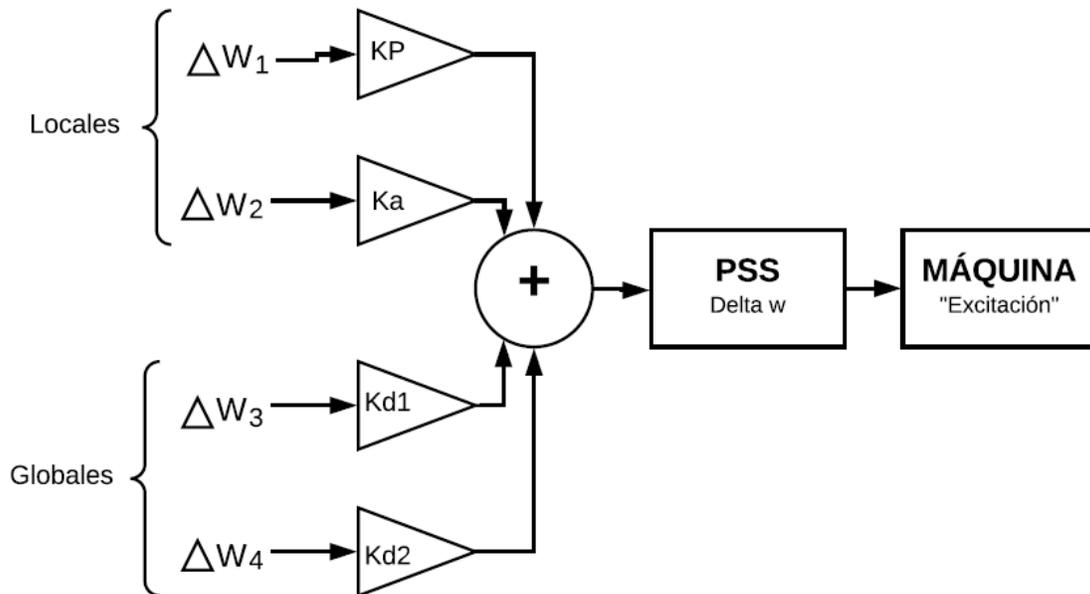


Figura 8. Diagrama de bloques para una sola máquina de la estrategia Delta - W implementada

3) los valores de  $l_{ij}$  deben ser iguales a 1 si  $i = j$ , y en caso contrario deben ser menores a -1. Con este criterio se garantiza que todas las entradas de las otras máquinas tengan una afectación negativa [46].

En conclusión, la metodología descrita es un proceso de realimentación de salidas en lazo cerrado ponderado por la Matriz  $K_d$  y es precisamente por esta razón que la metodología descrita se denomina Delta w Ponderado Multiárea o Delta-w-PM o  $\Delta\omega$ -PM [48].

#### 4. SIMULACIONES, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para efectuar las simulaciones se usará el sistema de prueba Kundur el cual se ilustra en la Figura 10. El sistema Kundur muestra la conexión de 2 áreas eléctricas diferentes las cuales representan dos áreas operativas. Cada área posee dos unidades generadoras  $G_i$ , una carga  $L_i$  y un compensador de reactivos  $C_i$ . El área 1 y el área 2 se encuentran unidas mediante dos líneas principales de conexión entre los nodos 7, 8 y 9. Estas dos áreas se interconectan para integrar sus capacidades de generación.

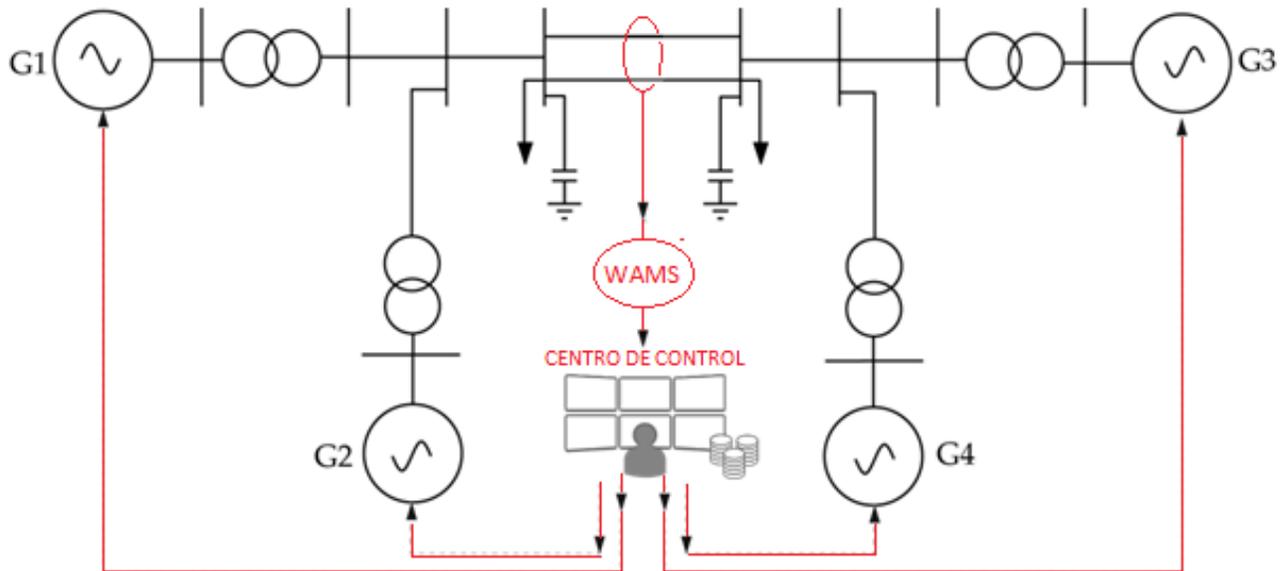


Figura 9. Sistema de prueba Kundur

Para el propósito de este trabajo se consideró la simulación de una perturbación para el sistema de potencia en estado estable. La perturbación consiste en una falla trifásica en su línea principal.

A pesar de su pequeño tamaño, el sistema simulado tiene problemas y dinámicas similares a los sistemas reales. Tiene dos áreas de generación coherente con cuatro máquinas, cada una con su correspondiente regulador y Regulador Automático de Voltaje (AVR). Las dos líneas principales garantizan el intercambio de energía entre ambas áreas.

A continuación se presentarán las gráficas de las simulaciones con PSS's del tipo delta-w y delta-w modificado Multiárea, para diferentes tiempos de retardo.

#### 4.1 Resultados del funcionamiento de la estrategia delta - w

En la figura 11 se observa el diagrama de bloques del sistema con retardo donde el efecto del retardo se presenta en lazo cerrado con la estrategia de control Delta - w. El retardo simula las comunicaciones asociadas al monitoreo, cuyos valores se entregan a la estrategia de control. Es así como el control efectúa cálculos para entregar unas señales que llegan a los actuadores del sistema eléctrico. De ésta forma se logra mantener la señal de la salida en el valor de referencia a pesar de las perturbaciones ocasionadas por perturbaciones internas o fallas.

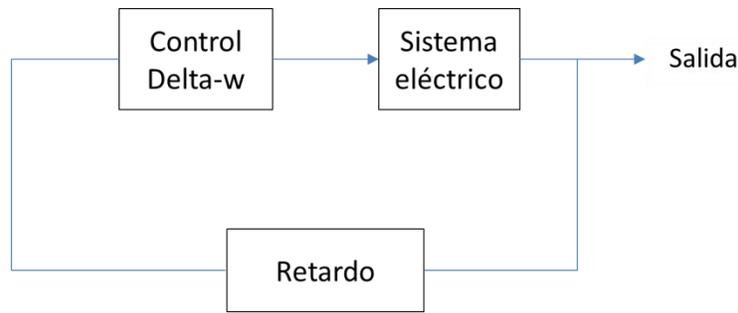


Figura 10. Diagrama de bloques del funcionamiento de la estrategia de control Delta-w con retardo

El anterior esquema se usará para construir las simulaciones del caso y hacer que el retardo varíe en un rango definido. Tanto el control como el sistema eléctrico y el retardo se implementan en SimPowerSystems de Matlab.

Los tiempos de retardo usados pueden encontrarse en múltiples documentos. Se usa fundamentalmente lo hallado en [50]. Los valores típicos usados en los retardos varían de 0.1 s hasta 1 s.

#### 4.1.1 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.1$ (estrategia delta - w)

Esta simulación se implementa con base en el diagrama de bloques anteriormente ilustrado.

En la figura 12 se puede observar que la señal de potencia se torna ligeramente estable después de 3 segundos, con fluctuaciones que no superan los 50 [Mw]. Se observa además comportamiento estable aunque con pequeñas oscilaciones.

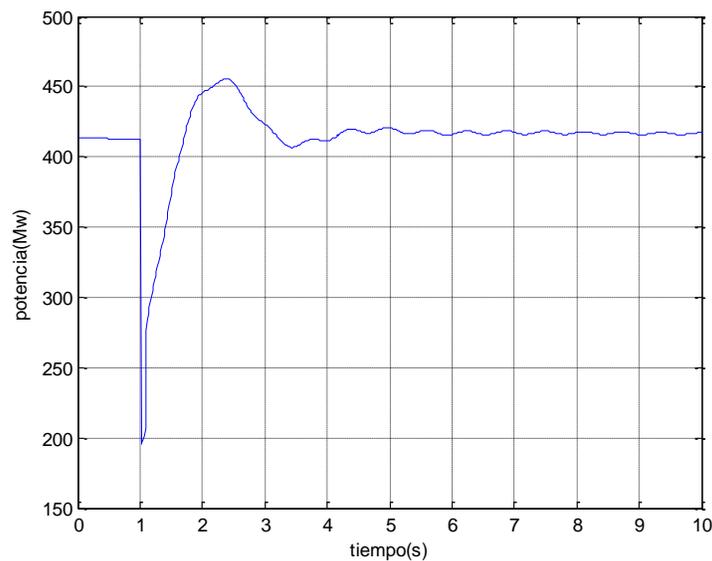


Figura 11. Potencia con retardo  $T_d= 0.1$

En la figura 13 se puede observar que las desviaciones angulares de las máquinas alcanzan su valor de estado estacionario después de 3 segundos. Este comportamiento es importante porque se asocia a los intercambios de potencia entre las áreas.

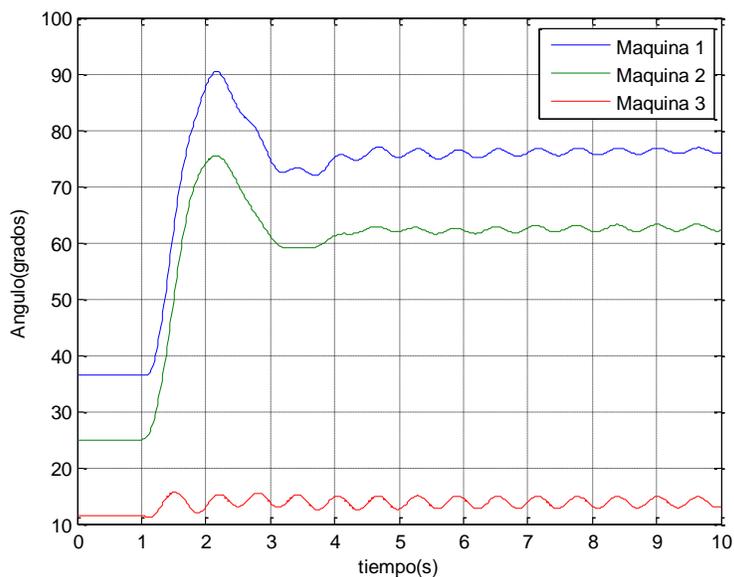


Figura 12. Ángulo de los generadores con respecto a la maquina 4

En la figura 14 se puede observar que las señales de tensión de los generadores son estables, pero con oscilaciones amortiguadas.

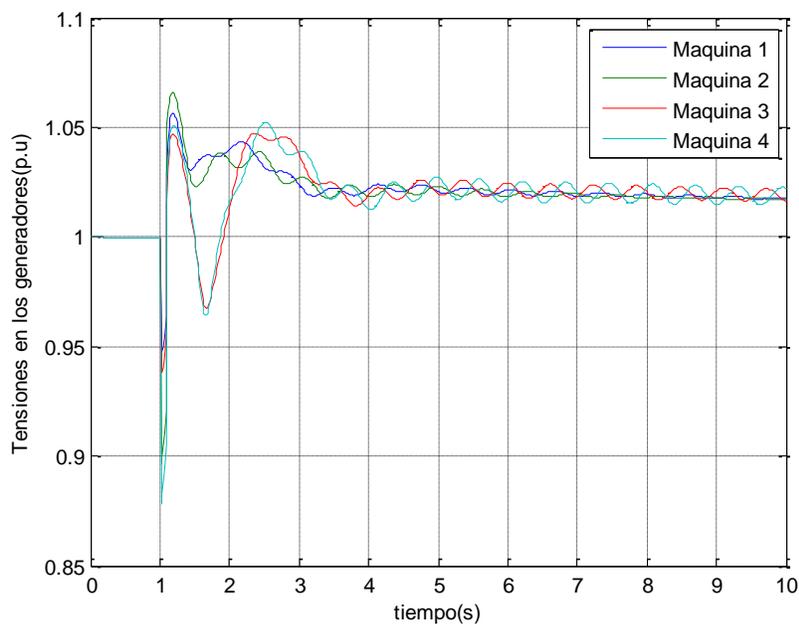


Figura 13. Tensiones en las unidades generadoras

### 4.1.2 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.2$ (estrategia delta - w)

Se efectúan las simulaciones considerando un retardo de 0.2 s. En este caso, es evidente la aparición del comportamiento inestable. Lo anterior se refleja en las oscilaciones siempre crecientes del valor de la potencia transferida. Ver figura 15.

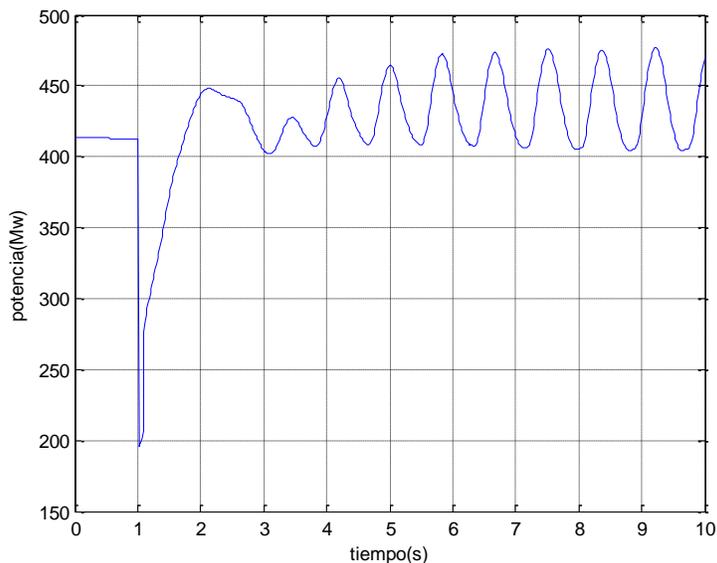


Figura 14. Potencia con retardo  $T_d=0.2$

En la figura 16 se puede observar que la señal correspondiente a dos de los ángulos de los respectivos generadores es inestable. Lo anterior corresponde con el comportamiento de la potencia

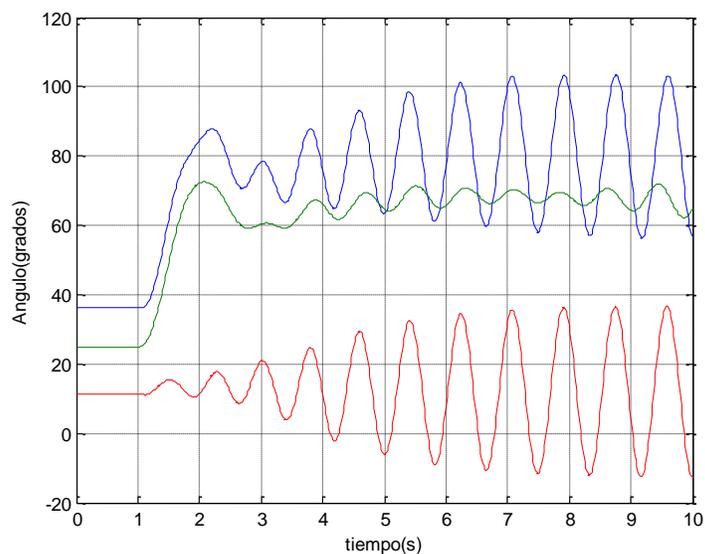


Figura 15. Ángulo de los generadores con respecto a la máquina 4

En la figura 17 se puede observar que las señales de tensión correspondiente a los cuatro generadores también se hacen inestables. Se esperaba dado que la inestabilidad afecta a todas las variables del sistema de potencia.

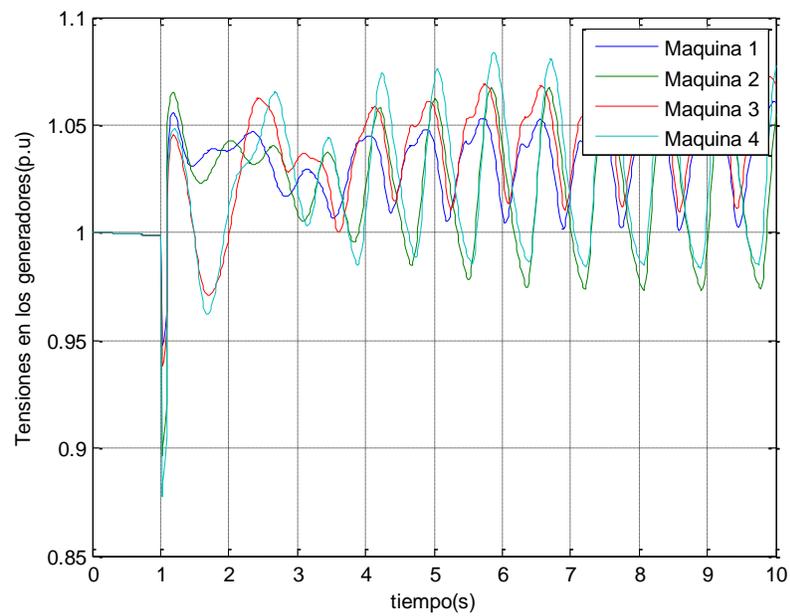


Figura 16. Tensiones en las unidades generadoras

### 4.1.3 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.3$ (estrategia delta - w)

En la figura 18 se tiene el comportamiento de las señales de potencia transferida entre las áreas. Aquí, de nuevo, con un retardo de 0.3 segundos se verifica que el sistema se hace inestable frente a la perturbación de la falla en el instante  $t=1$  s.

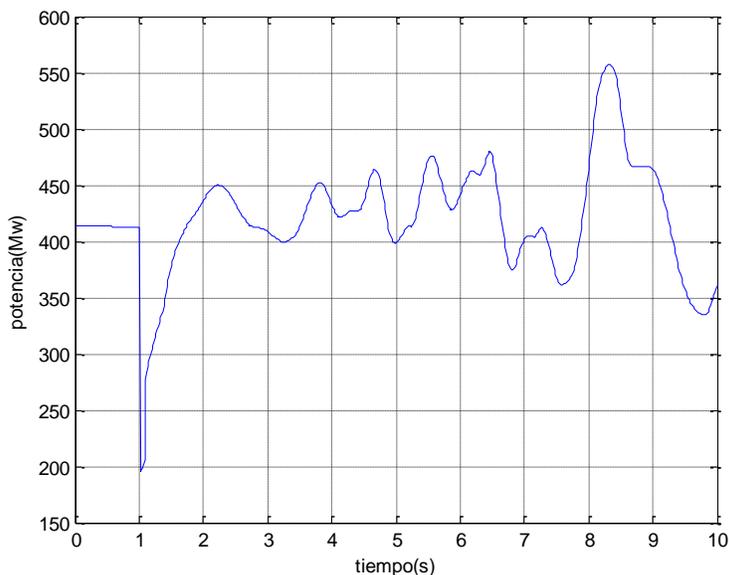


Figura 17. Potencia con retardo  $T_d = 0.3$

Es lógico que la inestabilidad del sistema conduzca a la inestabilidad del resto de sus variables. Por tanto, se verifica que la apertura angular entre las diferentes máquinas también es inestable. Ver figura 19.

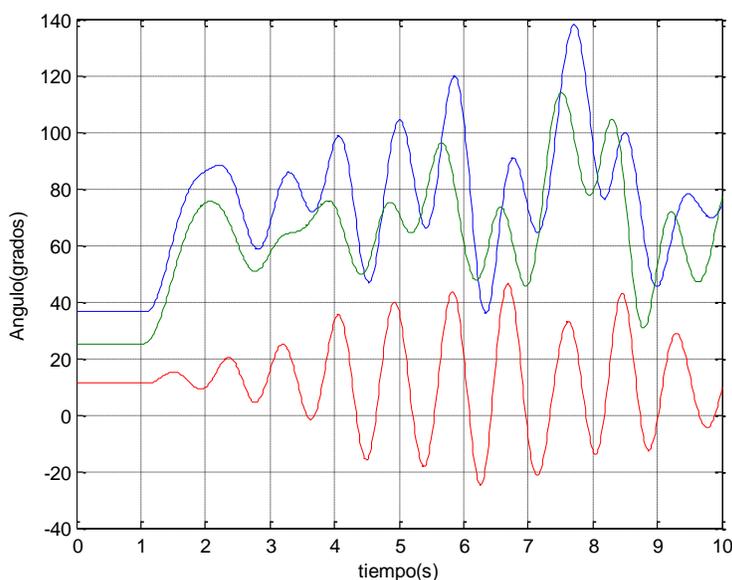


Figura 18. Ángulo de los generadores con respecto a la máquina 4

En la figura 20 se ilustra que los valores de las tensiones también presentan el comportamiento inestable. Lo anterior es lógico en el escenario de inestabilidad provocado por el valor de 0.3 segundos de retardo en las comunicaciones.

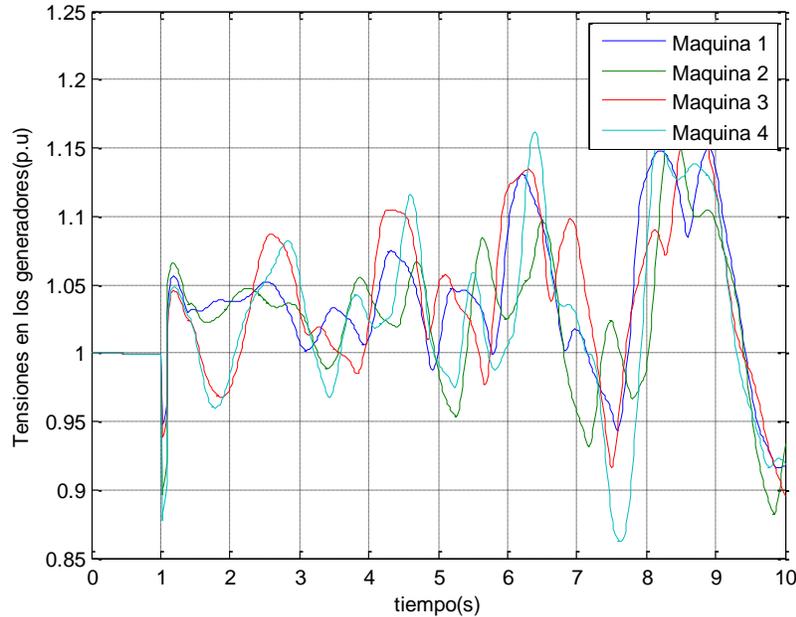


Figura 19. Tensiones en las unidades generador

## 4.2 Resultados del funcionamiento de la estrategia delta-w modificado multiárea con retardo

La figura 21 ilustra el diagrama de bloques de la implementación de la estrategia de control Delta-w- modificada multiárea. Al igual que en el anterior caso, aquí se incluyen los retardos en las comunicaciones, que actúan sobre el valor de la salida que es usada por la estrategia de control. Es así como el sistema eléctrico recibe una señal que modifica el valor de la salida.

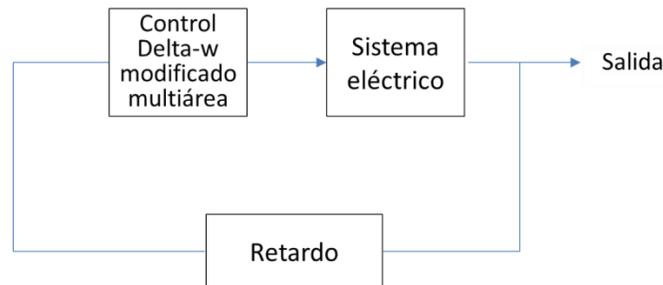


Figura 20. Diagrama de bloques del funcionamiento de la estrategia de control Delta-w modificada multiárea con retardo

#### 4.2.1 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.1$ (estrategia delta- $w$ modificada Multiárea)

En las figuras 22, 23 y 24 puede verse el comportamiento estable de los valores de potencia, ángulos y tensiones. Inclusive, el valor del sobreimpulso en la potencia luego de la falla está por debajo del sobreimpulso del caso de igual retardo controlado por el delta- $w$  simple. El comportamiento es en definitiva: estable.

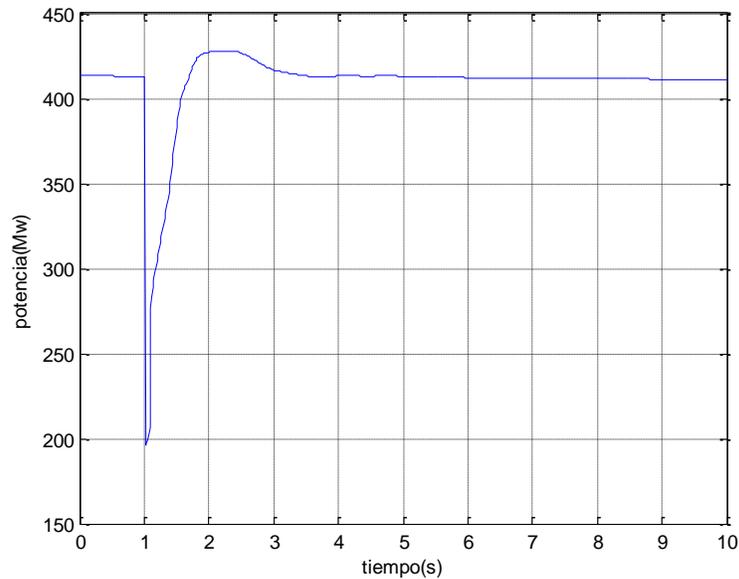


Figura 21. Potencia con retardo  $T_d=0.1$

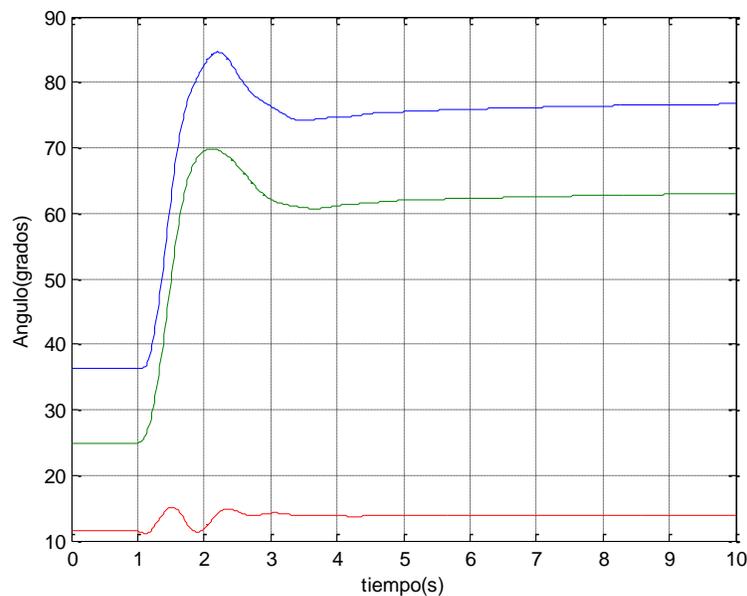


Figura 22. Ángulo de los generadores con respecto a la máquina 4

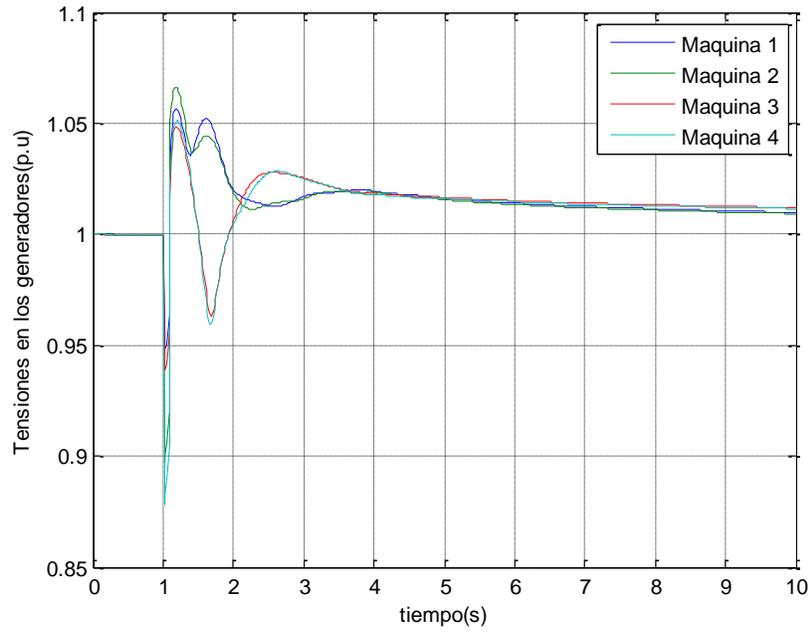


Figura 23. Tensiones en las unidades generadoras

#### 4.2.2 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.2$ (estrategia delta – w modificada)

Ya en el caso de considerar retardos mayores, de valor 0.2 segundos, se logra evidenciar que existe un incremento del valor de sobreimpulso de la señal de potencia. Este valor se ubica cercano a los 440 MW. No obstante, el comportamiento de la potencia transferida es estable. De igual manera, los comportamientos de las desviaciones angulares y de las tensiones también son estables. Ver figuras 25, 26 y 27.

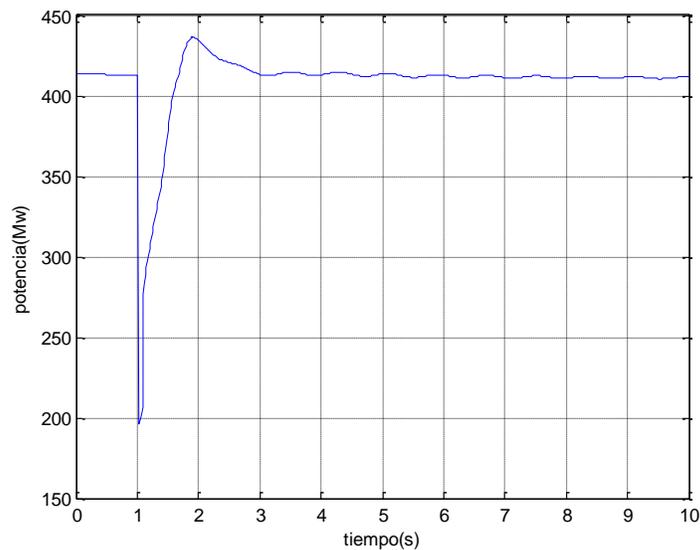


Figura 24. Potencia con retardo  $T_d=0.2$

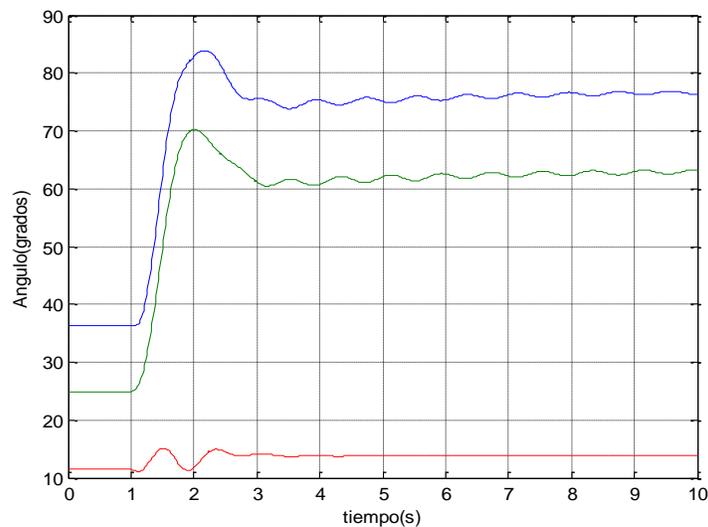


Figura 25. Ángulo de los generadores con respecto a la maquina 4

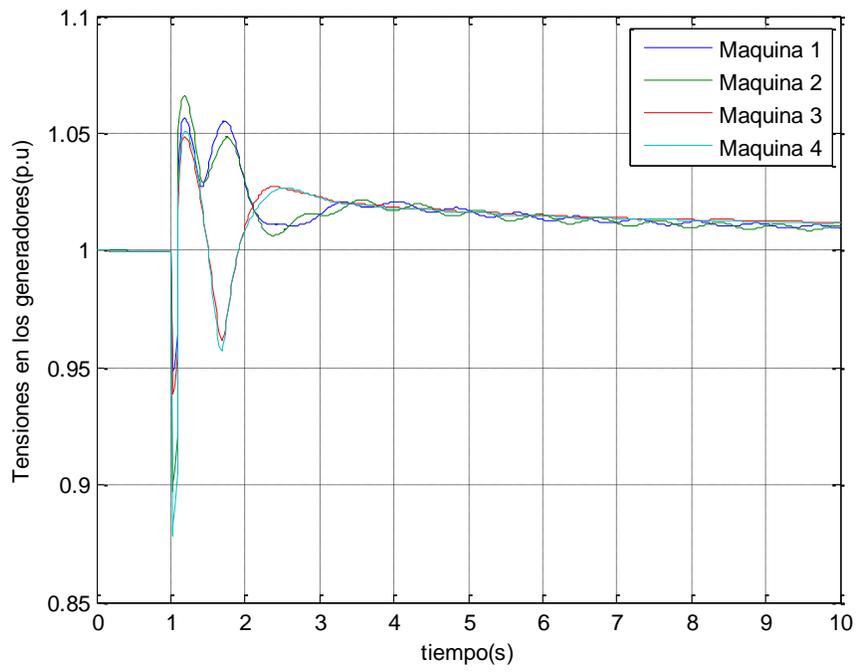


Figura 26. Tensiones en las unidades generadoras

### 4.2.3 Simulación con tiempo de retardo $T_d=0.6$ (estrategia delta – w modificada)

Para verificar la fiabilidad de la propuesta, en éste caso se incrementó dramáticamente el tiempo del retardo. En éste caso la simulación se efectuó hasta llegar a un valor de 0.6 segundos. Estos tiempos límites se presentan en sistemas de potencia de gran tamaño. Aún en estas condiciones, y a pesar de las enormes excursiones de potencia puede afirmarse que el sistema logra valores acotados en menos de 10 segundos y se comporta de manera estable. De igual forma, a pesar de las enormes variaciones de las desviaciones angulares y de las tensiones sus comportamientos son estables. Ver figuras 28, 29 y 30.

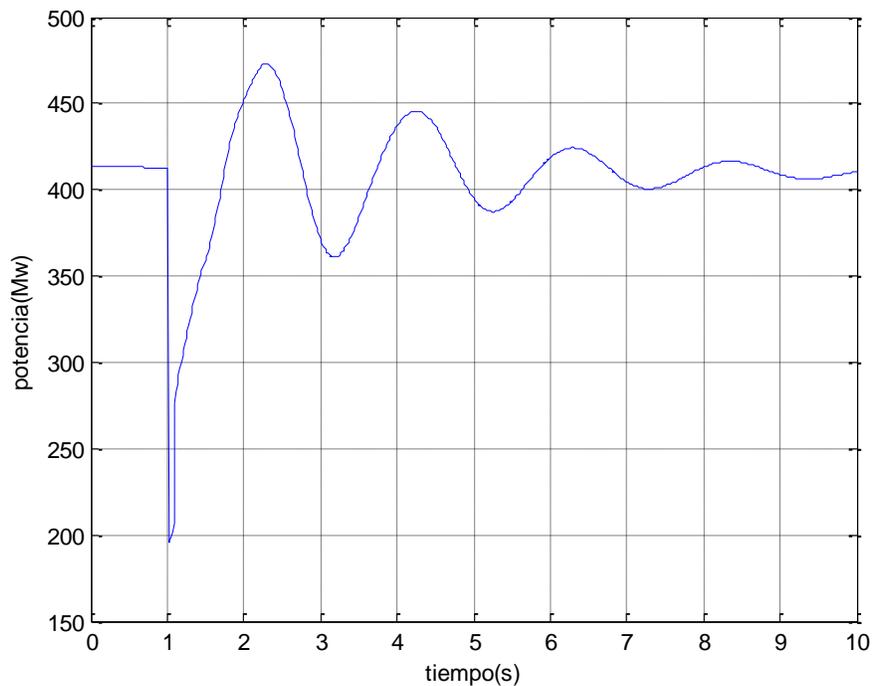


Figura 27. Potencia con retardo  $T_d=0.6$

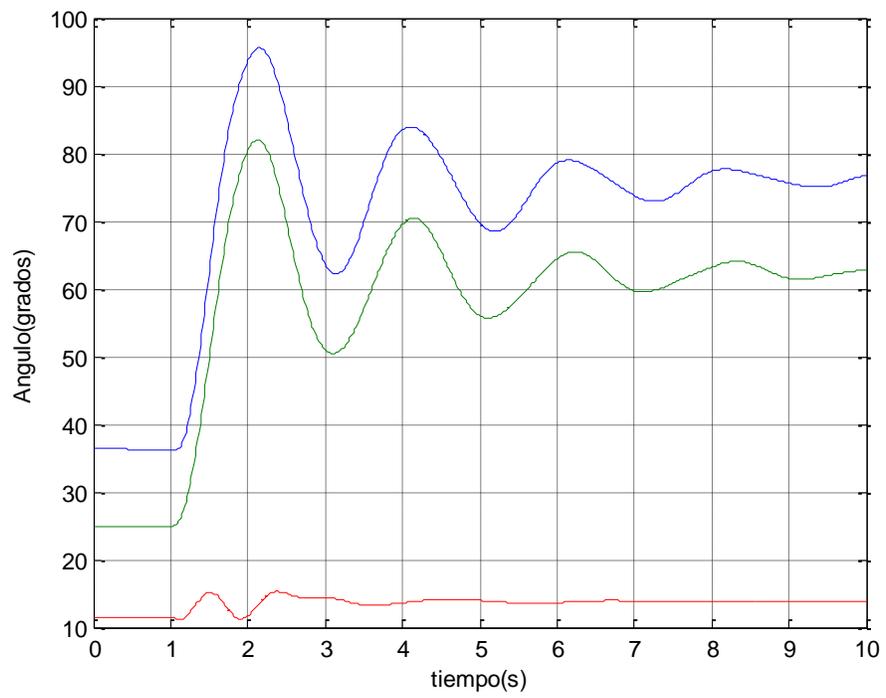


Figura 28. Angulo de los generadores con respecto a la maquina 4

#### 4.2.4 Simulación con tiempo de retardo $T_d=1.0$ (estrategia delta – w modificada)

En economía la prueba ácida es denominada a la prueba de mayor “tensión” o “presión externa”. En éste caso se efectuó la “prueba ácida” introduciendo un retardo de 1 segundo en las comunicaciones. Este tiempo es poco probable en sistemas que basan sus comunicaciones en protocolos como los TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Aun así, se incluyó su valor en las simulaciones. En éste caso, pese a que se tienen severas oscilaciones en los valores de la potencia transferida, el comportamiento logrado se verifica estable. Puede notarse también que los valores de las desviaciones angulares fueron notablemente oscilatorios, sin embargo, tienen tendencia a la estabilidad. Las tensiones también se comportan de manera estable pese a las oscilaciones, que se mantienen en rangos perfectamente válidos en un sistema de potencia realista [0.95-1.05]. Ver figuras 31, 32 y 33.

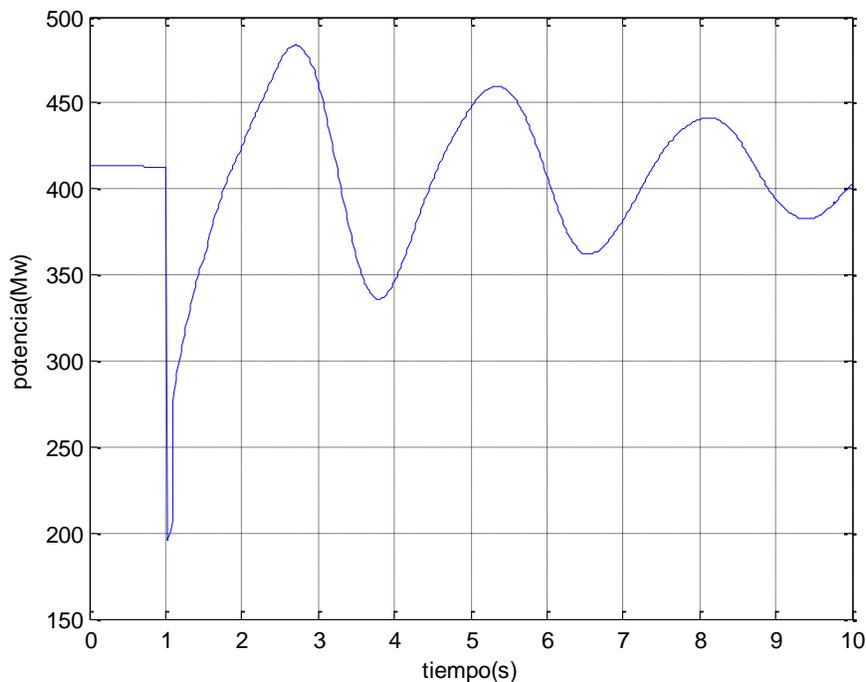


Figura 29. Potencia con retardo  $T_d=1.0$

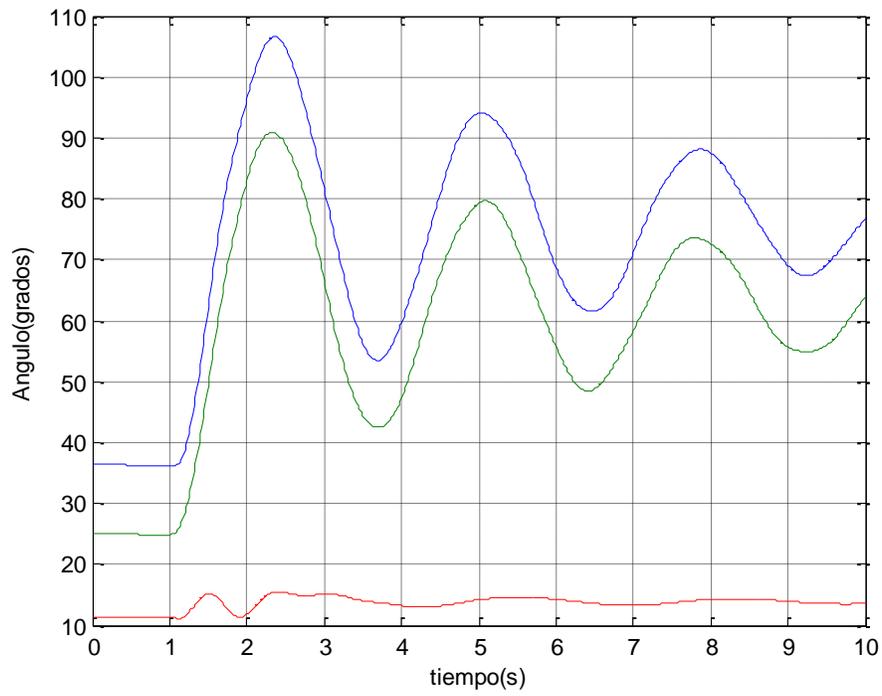


Figura 30. Angulo de los generadores con respecto a la maquina 4

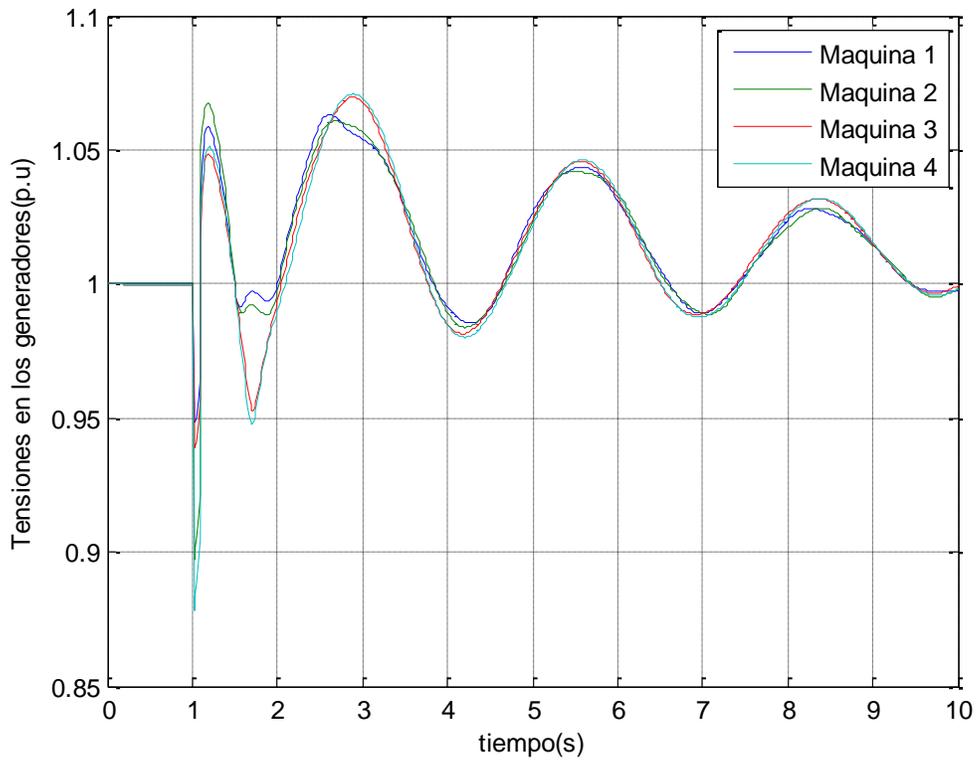


Figura 31. Tensiones en las unidades generadoras

### **4.3 Análisis en frecuencia del sistema de prueba**

En la anterior sección se efectuó un análisis cuantitativo del comportamiento del sistema eléctrico de prueba que es sometido a dos tipos de control para enfrentar el problema del retardo. En los casos generados por los dos tipos de controladores se obtuvieron figuras que ilustraban las potencialidades de la propuesta delta-w multiárea y en contraste las enormes oscilaciones y problemas de inestabilidad debidas a la incapacidad de actuación del control delta-w. En ésta sección se presenta un análisis cualitativo, de la función de transferencia, que permite verificar el comportamiento de los polos del sistema, de manera que el análisis de la propuesta quede más completo. El análisis en frecuencia se hace considerando un sistema con la presencia de retardo vamos a tener en la simulación los retardos se incluyen en las simulaciones y se hace un análisis teniendo en cuenta un retardo de  $T_d = 0.2$  s.

#### **4.3.1 Análisis en frecuencia con la estrategia delta-w sin retardo**

En esta subsección se hará un análisis de frecuencia del sistema de prueba Kundur. Inicialmente se hace el análisis en frecuencia de la propuesta delta – w considerando que no existen retardos es decir una estrategia delta-w sin retardo.

En la gráfica 34 se puede ver que hay estabilidad del sistema debido a que todos los polos que se representan con una x en la gráfica de polos y ceros todos los polos están en el semiplano complejo izquierdo esto quiere decir que el sistema es estable si se utiliza la estrategia delta – w.

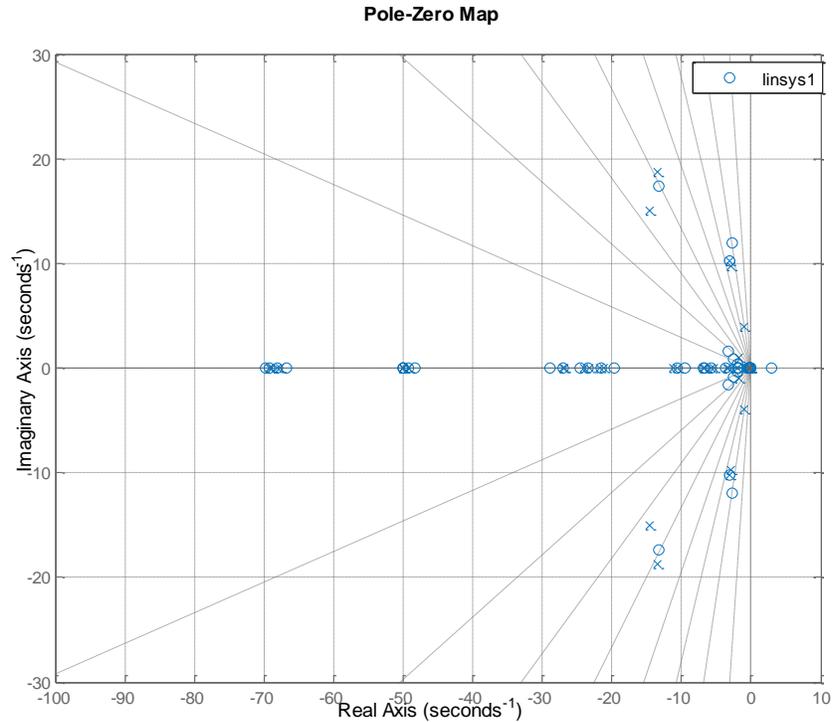


Figura 32. Grafica de polos y ceros.  
Estrategia delta – w sin retardo

### 4.3.2 Análisis en frecuencia con la estrategia delta-w con retardo

En la figura 35 se puede ver que para el mismo sistema y para la misma estrategia de control, si se agrega el retardo que en este caso fue de 0.2 segundos, se afecta inmediatamente la ubicación de los polos del sistema. Hay algo que cambia notablemente entre el sistema con retardo y el sistema sin retardo, y es que el sistema cuando tiene retardo, en el análisis de frecuencia, nos muestra unos polos en el semiplano complejo derecho o polos con parte real positiva. Eso significa que en el análisis en frecuencia se evidencia la inestabilidad agregada por el retardo.

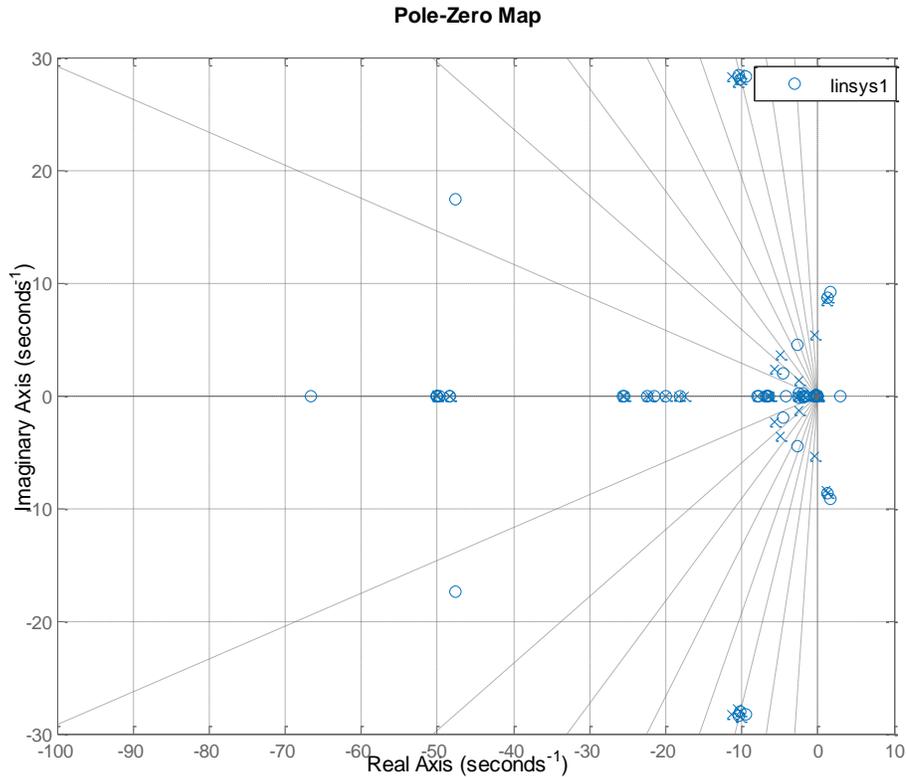


Figura 33. Grafica de polos y ceros.  
Estrategia delta – w con retardo

### 4.3.3 Análisis en frecuencia con la estrategia MultiArea con retardo

La propuesta, de acuerdo a la subsección inmediatamente anterior, se vio que era capaz de enfrentar el retardo de hasta 1 segundo, pero para reforzar esa idea y validar de mejor manera la hipótesis necesitamos hacer un análisis en frecuencia de ese sistema. Una vez efectuada esa simulación logramos notar que nuestra propuesta junto con el retardo, al hacer el análisis en frecuencia, nos muestra que todos los polos están en el semiplano complejo izquierdo, esa es una noticia muy buena porque ese análisis en frecuencia verifica que nuestra propuesta estaba funcionando bien, no por azar, sino porque cualitativamente se modificó el comportamiento del sistema eléctrico y el sistema de control, es decir, todo el sistema en lazo cerrado es estable y esa estabilidad es precisamente la que estamos nosotros buscando cuando diseñamos esquemas de control para sistemas de potencia. Se hace énfasis en que el sistema de potencia con el retardo en lazo cerrado, en general, se hace estable, la propuesta delta-w permanece inestable,

mientras que nuestra propuesta de control delta-w Multiárea hace que nuestro sistema de control en lazo cerrado permanezca funcionando de manera estable. Ver figura 36.

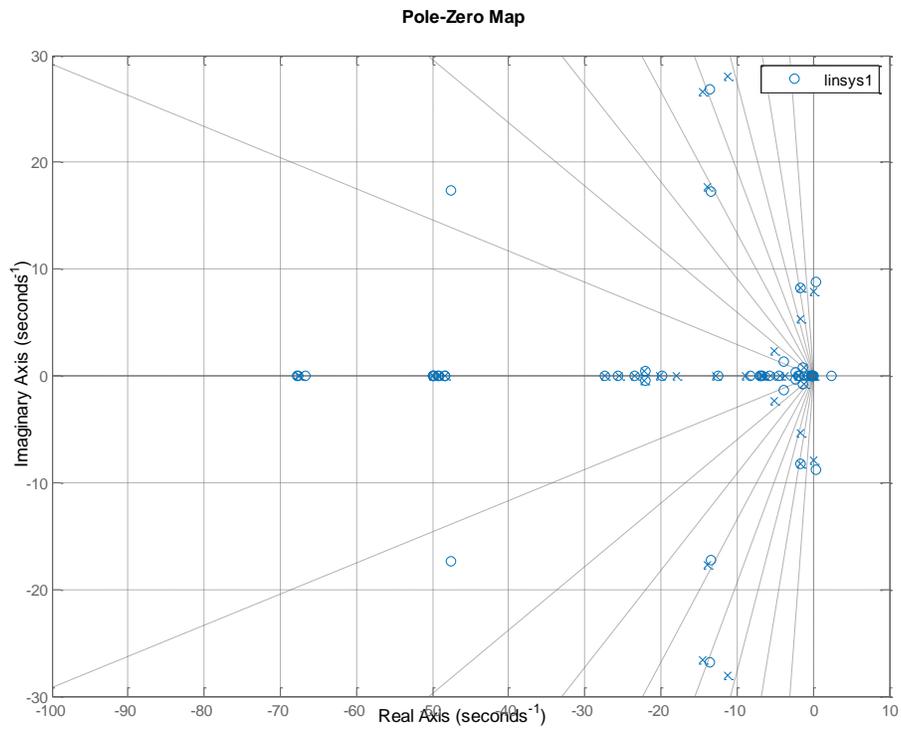


Figura 34. Grafica de polos y ceros.  
Estrategia Multiárea con retardo

## 5. CONCLUSIONES

Durante la investigación se logró encontrar sendas fuentes de información asociadas a los problemas de estabilidad de los sistemas de potencia que son afectados por retardos.

Así mismo, y basado en la lectura especializada, se construyó un modelo coherente y fácil de utilizar en sistemas de potencia, que permitían incluir los retardos de las comunicaciones. Tal representación se basó en el modelo de PADÉ. No fue necesario usar modelos de orden elevado.

Con lo anterior se implementó un modelo del sistema de área amplia que incluía el retardo así como dos estrategias de control. Una de las estrategias es el control clásico delta-w y la otra estrategia implementada fue delta-w modificado multitarea, propuesta desarrollada al interior del grupo de investigación en campos electromagnéticos y fenómenos energéticos (CAFE). De ésta manera se pudieron comparar los efectos y posibilidades.

De acuerdo con las simulaciones, la propuesta denominada delta-w modificada multiárea es superior a la clásica delta-w y funcionó adecuadamente aún en retardos tan altos como 1 segundo.

Finalmente, se efectuó un análisis de frecuencia para detectar las modificaciones que incluían tanto el retardo como la estrategia de control. Se logró evidenciar que efectivamente el retardo mueve los polos hacia el semiplano complejo derecho, lo que hace que un sistema previamente estable se transforme en un sistema inestable.

Se verificó también que la propuesta implementada fue capaz de mantener los polos dentro de la región de estabilidad. La anterior conclusión es verdaderamente poderosa toda vez que ilustra que el comportamiento estable conseguido se logra por una modificación de los polos inestables incluidos por el retardo hacia polos dentro de la región de estabilidad.

## 6. REFERENCIAS

- [1] P. Kundur, *Power system stability and control*, New York: McGraw Hill, 1994.
- [2] J. Machowski and J. Bialek, *Power System Dynamics: Stability and Control*, London: Wiley, 2009.
- [3] C. Rehtanz, Y. Li, Y. Cao and D. Yang, *Interconnected Power Systems: Wide-area Dynamic Monitoring and Control Applications*, Berlin: Springer, 2016.
- [4] R. Iravani and M. Ramadan, "Wide-area Damping Control for Inter-area Oscillations: A Comprehensive Review," in *2013 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Halifax-Canadá, 2013.
- [5] G. Rogers, P. Kundur and M. Klein, "A fundamental study of inter-area oscillations in power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 914-921, 1991.
- [6] W. Mittelstadt, J. Hauer, P. Krause and R. Wilson, "The DOE Wide Area Measurement System (WAMS) Project -- Demonstration of dynamic information technology for the future power system," in *joint conference on fault and disturbance analysis: precise measurement in power systems*, Arlington, VA, Arlington, 1995.
- [7] System Oscillations Working Group, "Inter-area oscillations in power systems / prepared by the System Oscillations Working Group," IEEE Service Center, Piscataway, 1995.
- [8] A. R. Messina, *Inter-Area Oscillations in Power Systems: A Nonlinear and Nonstationary Perspective*, New York: Springer, 2009.
- [9] K. Boroojeni, M. Hadi Amini and S. S. Iyengar, "Overview of the Security and Privacy Issues in Smart Grids," in *Smart Grids: Security and Privacy Issues*, Springer, 2016, pp. 1-16.
- [10] B. Pal and B. Chaudhuri, *Robust Control in Power Systems*, New York: Springer, 2005.
- [11] D. Ivanescu, N. Hadjsaid, A. Snyder, J.-M. Dion, L. Dugard and D. Georges, "Control of an Interconnected Power System: A Time Delay Approach," *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, vol. 19, pp. 115-131, 2002.
- [12] J. Antony and W. Jun, "Integrated system architecture and technology roadmap toward WAMPAC," in *IEEE PES Proceedings on Innovative Smart Grid Technologies*,

California, 2011.

- [13] E. Hossain, Z. Han and H. Vincent, *Smart Grid Communications and Networking*, New York: Cambridge University Press, 2012.
- [14] Y. Cao, X. Shi, Y. Li, Y. Tan, M. Shahidehpour y S. Shi, «A Simplified Co-Simulation Model to Investigate Impacts of Cyber-Contingency on Power System,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, n° 99, 2017.
- [15] F. Milano and M. Anghel, "Impact of Time Delays on Power System Stability," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 59, no. 4, pp. 889-900, 2012.
- [16] H. Wu, K. Tsakalis and G. Heydt, "Evaluation of Time Delay Effects to Wide-Area Power System Stabilizer Design," *IEEE Transactions on Power Systems* , vol. 19, no. 4, pp. 1935-1941, 2004.
- [17] V. Rajkumar and R. Mohler, "Nonlinear control methods for power systems: a comparison," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 231-237, 1995.
- [18] A. Molina-Cabrera, O. Gomez and M. Rios, "Smith Predictor Based Backstepping Control For Damping Power System Oscillations," in *2014 IEEE Power Engineering Society Transmission And Distribution Latin America (PES T&D-LA)*, Medellin-Colombia, 2014.
- [19] N. HadjSaid, A. Roosta and D. Georges, "Nonlinear Control for Power Systemas based on a Backstepping method," in *Proceedings of the 40th IEEE Conferences on Decision and Control 2001*, Orlando-FL, 2001.
- [20] S. Shojaeian, S. Jafar and G. Arab, "Damping of Low Frequency Oscillations of Multi-Machine Multi-UPFC Power Systems, Based on Adaptive Input-Output Feedback Linearization Control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 1831-1840, 2012.
- [21] Y. Li, Y. Zhou, F. Liu and Y. Cao, "Design and Implementation of Delay-Dependent Wide-Area Damping Control for Stability Enhancement of Power Systems," *IEEE Transactions on Smart Grids*, vol. 8, no. 4, pp. 1831-1842, 2017.
- [22] N. Manjarekar, R. Banavar and R. Ortega, "Application of Passivity-based Control to Stabilization of the SMIB System with Controllable Series Devices," in *Proceedings of the 17th World Congress of The IFAC*, Seoul-Korea, 2008.
- [23] P. M. Vahdati, A. Kazemi, M. Hadi amini and L. Vanfretti, "Hopf Bifurcation Control

- of Power Systems Nonlinear Dynamics Via a Dynamic State Feedback Controller- Part I: Theory and Modelling," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 3217-3228, 2017.
- [24] M. Taleb, M. Zribi and M. Rayan, "On the Control of Time Delay Power Systems," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 9, no. 2, pp. 769-792, 2013.
- [25] K. Liao, Z. He, Y. Wang and J. Yang, "An input-output linearization algorithm-based inter-area damping control strategy for DFIG," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, pp. 1-6, 2017.
- [26] Y. Li, F. Liu and Y. Cao, "Delay-Dependent Wide-Area Damping Control for Stability Enhancement of HVDC/AC interconnected Power Systems," *Control Engineering Practice*, vol. 37, pp. 43-54, 2015.
- [27] Q.-C. Zhong, *Robust Control of Time-Delay Systems*, Liverpool: Springer, 2006.
- [28] R. Majumder, B. Chaudhuri, B. Pal and Q. Zhong, "A Unified Smith Predictor Approach for Power System Damping Control Design Using Remote Signal," *IEEE Transactions on Control Systems technology*, vol. 13, no. 6, pp. 1063-1068, 2005.
- [29] N. R. Chaudhuri, S. Ray, R. Majunder and B. Chaudhuri, "A New Approach to Continuous Latency Compensation With Adaptive Phasor Power Oscillation Damping Controller (POD)," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 02, pp. 939-946, 2010.
- [30] M. Mokhtari, F. Aminifar and D. Nazarpour, "Wide-area power oscillation damping with a fuzzy controller compensating the continuous communications delays," *IEEE transactions on power systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1997-2005, 2013.
- [31] M. Krstic, *Delay Compensation for Nonlinear, Adaptive and PDE Systems*, Berlin: Springer, 2009.
- [32] B. P. a. B. Chaudhuri, «Robust Control in Power Systems,» *Springer*, 2005.
- [33] P. V. M. A. a. M. G. S. N. R. Sandell, « "Survey of Decentralized Control Methods for Large Scale Systems," » *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1978.
- [34] P. Kundur, « Power system stability and control,» *New York: McGraw Hill*, 1994..
- [35] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, New Jersey: Prentice Hall, 2002.

- [36] J. R. a. D. Mayne, « Model Predictive Control: Theory and Design,» *Madison: Nob Hill Publishing*, 2013.
- [37] H. Horisberger, "Observability Analysis for Power Systems with Measurement Deficiencies," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 18, no. 7, pp. 51-58, 1985.
- [38] E. Fetzter, "Phd dissertation: Observability in the state estimation of power systems," Iowa State University digital repository, IOWA, 1972.
- [39] D. Ivanescu, N. Hadjsaid, A. Snyder, J.-M. Dion and L. Dugard, "Robust Stabilizing Control for an Interconnected Power System: Time Delay Approach," in *Proceedings of the Fourteenth International Symposium of Mathematical Theory of Networks and Systems*, Perpignan-Francia, 2000.
- [40] N. R. Sandell, P. Varaiya, M. Athans and M. G. Safonov, "Survey of Decentralized Control Methods for Large Scale Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 23, no. 2, pp. 108-128, 1978.
- [41] P. Christofides, R. Scattolini and D. Muñoz, "Distributed Model Predictive Control: A Tutorial Review and Future Research Directions," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 51, pp. 21-41, 2012.
- [42] D. D. Siljack and A. I. Zecevic, "Control of Large-Scale Systems: Beyond Decentralized Feedback," *Annual Reviews in Control*, vol. 29, no. 2, pp. 169-179, 2005.
- [43] R. Shankar, S. R. Pradhan, K. Chatterjee and R. Mandal, "A comprehensive state of the art literature survey on LFC mechanism for power system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 1185-1207, 2017.
- [44] G. Manfred, "Stability and Stabilization of Time-Delay Systems," Zurich, 1995.
- [45] S. Ray and G. Venayagamoorthy, "Real-time Implementation of a Measurement-Based Adaptative Wide-Area Control System Considering Communication Delays," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 2, no. 1, pp. 62-70, 2008.
- [46] Y. Hu, V. Madani, R. Moraes and D. Novosel, "Requirements of large-scale wide area monitoring, protection and control systems," in *Proceedings on Fault Disturbance Analysis Conference*, Atlanta, 2007.
- [47] P. Kundur, M. Klein y G. Rogers, «A fundamental Study of inter-area oscillations in power systems».
- [48] A. Loaiza, «Implementación de control en sistemas de potencia de area amplia con

medidas retardadas,» 2016.

- [49] D. Cai, *Wide Area Monitoring, Protection and Control in the Future Great Britain Power System*, Londres: University of Manchester, 2012.
- [50] B. Pal and B. Chaudhuri, *Robust Control in Power Systems*, New York: Springer, 2005.
- [51] B. Chaudhuri, R. Majumder and B. Pal, "A Unified Smith Predictor Approach for Power System Damping Control Design Using remote Signals," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 6, pp. 1063-1068, 2005.
- [52] M. Mokhtari and F. Aminifar, "Wide-Area Power System Oscillation Damping With a Fuzzy Controller Compensating the Continuous Communication Delays," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1997-2005, 2013.
- [53] J. Maciejowsky, *Predictive Control with Constraints*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 2002.
- [54] J. A. Rossiter, *Model-Based Predictive Control: A Practical Approach*, Boca raton: CRC Press, 2003.
- [55] D. Wang, M. Glavic and L. Wehenkel, "Comparison of Centralized, Distributed and Hierarchical Model Predictive Control Schemes for Electromechanical Oscillations Damping in Large-Scale Power Systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 58, pp. 32-41, 2014.
- [56] R. Iravani, S. Azad and J. Euzebe, "Damping Inter-Area Oscillations Based on a Model Predictive Control (MPC) HVDC Supplementary Controller," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3174-3183, 2013.
- [57] W. Yao, L. Jiang, J. Wen and Q. Wu, "Wide-Area Damping Controller for Power System Interarea Oscillations: A Networked Predictive Control Approach," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 1-10, 2014.
- [58] M. Shiroei and A. M. Ranjbar, "Supervisory predictive control of power system load frequency control," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 61, pp. 70-80, 2014.
- [59] H. Ye and Y. Liu, "Design of model predictive controllers for adaptive damping of inter-area oscillations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 45, no. 1, pp. 509-518, 2013.

- [60] A. Molina-Cabrera, M. Velasquez and M. A. Ríos, "Model Predictive Control for Non-Linear Delayed Power Systems," in *2015 IEEE Eindhoven Powertech*, Eindhoven, 2015.
- [61] A. Molina-Cabrera and M. A. Rios, "A Kalman Latency Compensation Strategy for Model Predictive Control to Damp Inter-Area Oscillations in Delayed Power Systems," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 11, no. 3, 2016.
- [62] A. Bosé, "Smart Transmission Grid Applications and Their Supporting Infrastructure," *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 11-19, 2010.
- [63] P. Zhang, L. Fangxing y Q. Wei, «Smart Transmission Grid: Vision and Framework,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, n° 2, pp. 168 - 177, 2010.
- [64] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Anderson, A. Bose y C. Canizares, «Definition and Classification of Power System Stability,» *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 19, n° 2, pp. 1387-1401, 2004.
- [65] A. Roman-Messina, *Inter-area Oscillations in Power Systems: A Nonlinear and Nonstationary Perspective*, Springer US, 2009.
- [66] IEEE Working Group on Systems Oscillations, "Inter-Area Oscillations in Power Systems," *IEEE Special Publication*, vol. 1, no. 1, p. 11, 1995.
- [67] A. Johnson, J. Wen and J. Wang, "Integrated System Architecture and Technologu Roadmap toward WAMPAC," in *2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, California, 2011.
- [68] B. Naduvathuparambil, M. Valenti and A. Feliachi, "Communication delays in wide area measurement systems," in *Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory*, 2002, 2002.
- [69] M. Chenine and L. Nordstrom, "Modeling and Simulation of Wide-Area Communication for Centralized PMU-Based Applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1372-1380, 2011.
- [70] W. Liu, H. Luo, S. Li and D. Gao, "Investigation and Modeling of Communication Delays in Wide Area Measurement System," in *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Shanghai, 2012.
- [71] I. Kamwa, J. Beland, G. Trudel and R. Grondin, "Wide-Area Monitoring and Control of Hydro-Quebec: Past, Present and Future," in *Proceedings of IEEE Power Engineer Society General Meeting*, Montreal, 2006.

- [72] Y. Yuan, Y. Sun and G. Li, "Evaluation of Delayed Input Effects to PSS Interarea Damping Control Design," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.* , Tampa, 2007.
- [73] A. Chowdhury, A. Kulhare and G. Raina, "A study of the SMIB power system model with delayed feedback," in *2011 International Conference on Power and Energy Systems (ICPS)*, Chennai, 2011.
- [74] V. Rajkumar and R. Mohler, "Nonlinear control methods for power systems: a comparison," *IEEE Transactions on control systems and technology*, vol. 3, no. 2, pp. 231-237, 1995.
- [75] S. McArthur, E. Davidson, V. Catterson, A. Dimeas and F. Ponci, "Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications - Part II: Technologies, Standars, and Tools for Building Multi-agent Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1753-1759, 2007.
- [76] J. Rawlings and D. Mayne, *Model Predictive Control: Theory and Design*, Madison: Nob Hill Publishing, 2013.
- [77] IEEE Standard Boards, "IEEE Std C37.118.2™-2011. IEEE Standard for Synchrophasor," IEEE Power & Energy Society, New York, 2011.
- [78] K. Zhu, M. Chenine and L. Nordstrom, "An Empirical Study of Synchrophasor Communication Delay in a Utility TCP/IP Network," *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 341-350, 2013.
- [79] W. Liu, H. Luo and S. Li, "Investigation and Modeling of Communication Delays in Wide Area Measurement System," in *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Shangai, 2012.
- [80] S. Mohagheghi, G. Venayagamoorthy and R. Harley, "Optimal Wide Area Controller and State Predictor for a Power System," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 693-705, 2007.
- [81] A. Feliachi and B. Naduvathuparambil, "Communication delays in wide area measurement systems," in *2002. Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory*, 2002.
- [82] G. Mohinder and A. Angus, *Kalman Filtering: Theory and Practice*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [83] M. Chakphed , "Power system state estimation using singular value decomposition,"

*Electric Power Systems Research*, pp. 98-107, 2003.

- [84] The Synchrophasor Team - Schweitzer Engineering Laboratories, "Got Latency?," *The Synchrophasor Report*, vol. 4, no. 5, p. 1, 2012.
- [85] S.-I. Niculescu and W. Michiels, *Stability, Control, and Computation for Time-Delay Systems: An Eigenvalue-Based Approach*, Philadelphia: SIAM, 2014.
- [86] N. Bekiaris-Liberis and M. Krstic, *Nonlinear Control Under Nonconstant Delays*, Philadelphia: SIAM, 2013.
- [87] J.-P. Richard, "Time-Delay Systems: an Overview of Some Recent Advances and Open Problems," *Automatica*, vol. 39, pp. 1667-1694, 2003.
- [88] M. A. Rios, "Modélisation pour Analyses Dynamiques des Réseaux Electriques avec Compensateurs de Puissance Réactive - SVC," Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, Grenoble, 1998.
- [89] E. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control*, London: Springer, 2007.
- [90] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [91] D. Wang, M. Glavic and L. Wehenkel, "Comparison of Centralized, Distributed and Hierarchical Model Predictive Control Schemes for Electromechanical Oscillations Damping in Large-Scale Power Systems," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 58, pp. 32-41, 2014.
- [92] D. Mayne and J. Rawlings, "Constrained model predictive control: Stability and optimality," *Automatica*, vol. 36, pp. 789-814, 2000.
- [93] H. Chen and F. Allgower, "A computationally attractive nonlinear predictive control scheme with guaranteed stability for stable systems," *Journal of Process Control*, vol. 8, no. 5, pp. 475-485, 1998.
- [94] A. I. Propoi, "Use of Linear Programming methods for Synthesizing," *Avtomat. i Telemekh*, vol. 24, no. 3, pp. 912-920, 1963.
- [95] H. Chen and F. Allgower, "A Quasi-infinite Horizon Nonlinear Model Predictive Control Scheme With Guaranteed Stability," *Automatica*, vol. 34, no. 10, pp. 1205-1218, 1998.
- [96] M. Krstic, P. Kokotovic and I. Kanellakopoulos, *Nonlinear and Adaptive Control*

Design, New York: John Wiley & Sons, 1995.

- [97] M. Reble, "Model Predictive Control for Nonlinear Continuous-Time Systems with and without Time-Delays," PhD Thesis, Stuttgart, 2013.
- [98] P. Albertos, P. García and R. Sanz, "Some Contributions to the Design of Dead-time compensators," in *14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2016*, Thailand, 2016.
- [99] J. Normey-Rico and E. Camacho, "Dead-time compensators: A Survey," *Control Engineering Practice*, vol. 16, no. 4, pp. 407-428, 2007.
- [100] P. García and P. Albertos, "Dead-time-compensator for unstable MIMO systems with multiple time delays," *Journal of Process Control*, vol. 20, no. 7, pp. 877-884, 2010.
- [101] S.-I. Niculescu, R. Sipahi, T. Vyhlídal and P. Pepe, *Time Delay Systems: Methods, Applications and new trends*, Chennai: Springer, 2012.
- [102] M. Grewal and A. Andrews, *Kalman Filtering: Theory and Practice*, New York: John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- [103] L. Bakule, "Decentralized Control: An Overview," *Annual Reviews in Control*, vol. 32, no. 1, pp. 87-98, 2008.
- [104] I. Kamwa, R. Grondin and Y. Hebert, "Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems-a decentralized/hierarchical approach," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 136-153, 2001.
- [105] R. Scattolini, "Architectures for Distributed and Hierarchical Model Predictive Control - A Review," *Journal of Process Control*, vol. 19, no. 5, pp. 723-731, 2009.
- [106] F. Allgöwer, M. Ma, H. Chen and X. Liu, "Distributed Model Predictive Load Frequency Control of Multi-area Interconnected Power System," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 62, pp. 289-298, 2014.
- [107] M. Andreasson, D. V. Dimarogonas, H. Sandberg and K. H. Johanson, "Distributed Control of Networked Dynamical Systems: Static Feedback, Integral Action and Consensus," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 59, no. 7, pp. 1750-1764, 2014.
- [108] E.-K. Boukas and Z.-K. Liu, *Deterministic and Stochastic Time Delay Systems*, Boston: Birkhäuser, 2002.

- [109] A. Hammer, "Analysis of IEEE Power System Stabilizer Models, Thesis of Master Science," Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2011.
- [110] J. Winkelman, J. Chow, J. Allemong and P. Kokotovic, "Multi-time-scale analysis of a power system," *Automatica*, vol. 16, no. 1, pp. 35-43, 1980.
- [111] E. Hairer and G. Wanner, *Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems*, Berlin: Springer, 2002.
- [112] M. Ehsani, M. Masten and I. Panabi, "Stiff System Control: A New Concept in Real Time Control," in *Proceedings of the American Control Conference*, San Diego, 1999.
- [113] A. A. Fouad, Saltam A. A. and M. E. Aboul-Ela, "Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 767-773, 1996.
- [114] K. Miettinen, *Nonlinear Multiobjective Optimization*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [115] M. A. Abido, "Parameter Optimization of Multimachine Power System Stabilizers using Genetic Local Search," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 785-794, 2001.
- [116] M. Eslami, H. Shareef, M. Raihan and M. Khajehzadeh, "Adaptive Particle Swarm Optimization for Simultaneous Design of UPFC Damping Controllers," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 57, pp. 116-128, 2014.
- [117] E. S. Ali and S. M. Abd, "Optimal Power System Stabilizers design via Cuckoo Search algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, pp. 99-107, 2016.
- [118] M. A. Rios, "Modélisation pour Analyses Dynamiques des Réseaux Electriques avec Compensateurs de Puissance Réactive - SVC," Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1998, 1998.
- [119] C.-T. Chen, *Linear System: Theory And Design.*, New York: Oxford Universty Press, 1984.
- [120] M. G. Safonov and R. Y. Chiang, "A Schur Method for Balanced-Truncation Model Reduction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 34, no. 7, pp. 729-733, 1989.
- [121] A. J. Laub, M. T. Heath, C. C. Paige and R. C. Ward, "Computation of System Balancing Transformations and Other Applications of Simolutaneous Diagonalization Algorithms," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vols. AC-32,

no. 2, pp. 115-122, 1987.

- [122] J. H. Chow, *Power System Coherency and Model Reduction*, New York: Springer, 2013.
- [123] H.-S. Nouredine, A. Roosta and D. Georges, "Nonlinear Control for Power Systems based on a Backstepping method," in *Proceedings of the 40th IEEE Conferences on Decision and Control 2001*, Orlando-FL, 2001.
- [124] Y.-n. Yu, *Electric Power System Dynamics*, Vancouver: Academic Press, 1983.
- [125] J. Grainger and W. Stevenson, *Power System Analysis*, London: Mc Graw Hill, 2016.
- [126] W. Youyi and D. Hill, "Transient Stability enhancement and voltage regulation of power systems," *IEEE transactions on power systems*, vol. 8, no. 2, pp. 620-626, 1993.
- [127] S. Kiat and M. Jovica, "Fuzzy Logic controller for decentralized stabilization of multimachine power system," *IEEE transactions on fuzzy systems*, vol. 16, no. 4, pp. 971-981, 2008.
- [128] P. B and S. Srivastava, "Robust Wide-Area TS Fuzzy Output Feedback Controller for Enhancement of Stability in Multimachine Power System," *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 426-434, 2012.
- [129] F. Dörfler, M. R. Jovanović, M. Chertkov and F. Bullo, "Sparse and optimal wide-area damping control in power networks," in *American Control Conference*, Washington, 2013.
- [130] A. Alireza and S. Shahrtash, "Dynamic Wide area voltage control strategy based on organized multi-agent system," *IEEE transaction on power systems*, vol. 29, no. 6, pp. 1-12, 2014.
- [131] A. Saberi and P. Kokotovic, "Global stabilization of partially linear composite systems," in *28th Conference on decision and control*, Tampa-Florida, 1989.
- [132] A. Snyder, "Master Thesis Inter-area oscillation damping with power system stabilizers and synchronized phasor measurements," Virginia Polytech Institute, Blacksburg-Virginia, 1997.
- [133] A. Snyder, D. Ivanescu, N. Hadjsaid and D. Georges, "Delayed-input wide-area stability control with synchronized phasor measurements and linear matrix inequalities," in *2000. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, 2000.

- [134] A. Snyder, D. Ivanescu, N. hadjsaid, D. Georges and T. Margotin, "Delayed-input wide-area stability control with synchronized phasor measurements and linear matrix inequalities," in *2000. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, 2000*.
- [135] K. Mekki, A. Snyder, N. Hadjsaid, R. Feuillet, D. Georges and T. Margotin, "Damping controller input-signal loss effects on the wide-area stability of an interconnected power system," in *2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, 2000*.
- [136] I. Hiskens, "Time-delay modelling for multi-layer power systems," *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 316-319, 2003.
- [137] H. Wu, "Ph.D. report Robust Control Design COnsidering Time Delay for Wide Area Power Systems," Arizona State University, Tempe-Arizona, 2003.
- [138] H. Wu and G. Heydt, "Design of Delayed-input wide area power system stabilizer," *Proceedings of 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, pp. 1935-1941, 2003.
- [139] C.-x. Dou, Q.-q. Jia and S.-J. Jin, "Delay-independent decentralized stabilizer design for large interconnected power systems based on WAMS," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 29, pp. 775-782, 2007.
- [140] C.-X. Dou, Z.-S. Duan and X.-B. Jia, "Delay-dependent Hinf robust control for large power systmes based on two-level hierarchical decentralised coordinated control structure," *International Journal of Systems Science*, vol. 44, no. 2, pp. 329-345, 2011.
- [141] G. Yu, B. Zhang and H. Xie, "Wide-area measurement-based nonlinear robust control of power system considering signals' delay and incompleteness," in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa-Florida, 2007*.
- [142] J. Qi, Q. Jiang, G. Wang and Y. Cao, "Wide-area time-delay robust damping control for power system," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 19, pp. 899-910, 2008.
- [143] F. Liu, R. Yokoyama, Y. Zhou and M. Wu, "Design of  $H_{\infty}$  robust damping controllers of FACTs devices with considering time-delay of wide-area signals," in *2011 IEEE PowerTech - Trondheim, Trondheim, 2011*.
- [144] Y. Li, C. Rehtanz, D. Yang, S. Ruberg and U. Hager, "Robust high-voltaje direct current stabilising control using wide-area emasurement and taking transmission time-delay into consideration," *IET generation, Transmission and Distribution*, vol. 5,

no. 3, pp. 289-297, 2010.

- [145] R. Dey and S. Ghosh, "H $\infty$  low frequency control of interconnected power systems with communication delays," *Electric Power and Energy Systems*, vol. 42, pp. 672-684, 2012.
- [146] W. Yao, L. Jiang, J. Wen and Q. Wu, "Wide-area damping controller of FACTS devices for inter-area oscillations considering communications time delays," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 29, no. 1, pp. 318-329, 2014.
- [147] H. Bevrani and T. Hiyama, "Robust decentralized PI based LFC design for time delay power system," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 193-204, 2008.
- [148] M. Saejia and I. Ngamroo, "A robust centralized SMES controller design based on WAMS considering system and communication delay uncertainties," *Electric Power System Research*, vol. 81, pp. 846-852, 2011.
- [149] H. Nguyen-Duc, L. Dessaint and A. Okou, "Analysis and design of a robust power system damping controller considering time-delay," *Electric Power Components and Systems*, vol. 39, pp. 254-270, 2011.
- [150] A. Hashmani and I. Erlich, "Delayed-Input Power System Stabilizer Using Supplementary Remote Signals," *Control Engineering Practice*, vol. 19, pp. 893-899, 2011.
- [151] I. Ngamroo, "Wide area robust centralized PSO-based specified structure Hinf Power System Damping Controller Design Considering Uncertainties in Time-Delay and System Parameters," *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, vol. 9, no. 3, pp. 1211-1231, 2013.
- [152] B. Chaudhuri, R. Majunder and B. Pal, "Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay," *IEEE Transaction on power systems*, vol. 19, no. 4, pp. 1971-1979, 2004.
- [153] W. Yao, L. Jian, Q. Wu, J. Wen and S. Cheng, "Design of Wide Area Damping Controllers Based on Networked Predictive Control Considering Communications Delays," in *IEEE PES General Meeting*, Providence-RI, 2010.
- [154] W. Yao, L. Jiang, Q. Wu, J. Wen and S. Cheng, "Delay-dependent Stability Analysis of the Power System with a Wide-Area Damping Controller Embedded," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 233-240, 2011.
- [155] W. Yao, L. Jiang, J. Y. Wen, S. J. Cheng and Q. H. Wu, "Networked Predictive Control

Based Wide-Area Supplementary Damping Controller of SVC with Communication Delays Compensation," in *2013 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES)*, Vancouver, 2013.

- [156] W. Yao, L. Jiang, Q. Wu and S. Cheng, "Wide-Area Damping Controller for Power System Interarea Oscillations: A Networked Predictive Control Approach," *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 27-36, 2015.
- [157] C. Hwang, "Mixed H<sub>2</sub>/H<sub>∞</sub> Optimization with Discrete Smith Predictor for Fuzzy Decentralized Control of Nonlinear Interconnected Discrete Dynamic Systems with Large Delay," in *2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Taipei, 2011.
- [158] B. Padhy, S. Srivastava and N. Verma, "A network delay compensation technique for wide-area SVC damping controller in power system," in *2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition*, Chicago-Illinois, 2014.
- [159] N. Kishor and L. Haarla, "Stability Analysis and Stabilization of Delayed Reduced-Order Model of Large Electric Power System," *International Transaction on Electrical Energy Systems*, vol. 26, no. 9, pp. 1882-1897, 2016.
- [160] O. Smith, "Closed Control of Loops with Dead Time," *Chemical Engineering Progress*, vol. 53, pp. 217-219, 1957.
- [161] J. Normey-Rico, c. Bordons and E. Camacho, "Improving the robustness of dead-time compensating PI controllers," *Control Engineering Practice*, vol. 5, no. 6, pp. 801-810, 1997.
- [162] J. Normey-Rico and E. Camacho, "Dead Time Compensators: a Unified Approach," in *Proceedings of IFAC-LDTS'98*, Grenoble-Francia, 1998.
- [163] L. Maza-Casas, M. Velasco-Villa and J. Alvarez-Gallegos, "Compensation of Input Time Delay for a Class of Nonlinear Systems," *Proceeding sof the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 1, pp. 4428-4429, 2002.
- [164] S.-I. Niculescu, "Delay Effects on Stability of Interconnected Ststems, a Control Perspective," in *16th Mediterranean Conference on Control and automation*, Ajaccio-France, 2008.
- [165] S. Niculescu, *Delay effects on stability. A robust control approach*, Heidelberg: Springer, 2001.
- [166] S. Niculescu and W. Michiels, *Stability, control and computation for time-delay systems. An eigenvalue based approach*, Philadelphia: SIAM - Series: Advances in

Control Design, 2014.

- [167] M. S. Almas and L. Vanfretti, "Implementation of conventional and phasor based power system stabilizing controls for real-time simulation," in *40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2014*, Dallas, 2014.
- [168] R. Negeborn, "Doctoral Thesis Multi-Agent Model Predictive Control with Applications to Power Networks," Dutch Institute of System and Control, Utrecht, 2007.
- [169] Y. Xia, "Analysis and Synthesis of NCSs with Tandom Forward Delay," in *Analysis and Synthesis of Dynamical Systems*, Berlin, Springer, 2009, pp. 153-176.
- [170] P. V. M. A. a. M. G. S. N. R. Sandell, «Survey of Decentralized Control Methods for Large Scale Systems,» *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 23, pp. 108-128, 1978.
- [171] J. M. a. J. Bialek, « Power System Dynamics: Stability and Control,» 2009.
- [172] E. Fetzer, « Observability in the state estimation of power systems,» *Iowa State University digital repository*, 1972.
- [173] N. H. A. S. J.-M. D. a. L. D. D. Ivanescu, «Robust Stabilizing Control for an Interconnected Power System: Time Delay Approach,» *Proceedings of the Fourteenth International Symposium of Mathematical Theory of Networks and Systems*, 2000.
- [174] R. S. a. D. M. P. Christofides, «Distribuited Model Predictive Control: A Tutorial Review and Future Research Directions,» *Computers and Chemical Engineering*, 2012.