

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE RETARDOS EN LAS SEÑALES EN
WIDE AREA MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEMS (WAMCS)**

Est. ALEXANDER RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

Est. BERNARDO ENRIQUE PÉREZ CABRALES



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA

2016

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE RETARDOS EN LAS SEÑALES EN
WIDE AREA MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEMS (WAMCS)**

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniero Electricista.**

Presentado por:

Est. ALEXANDER RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

Est. BERNARDO ENRIQUE PÉREZ CABRALES

Dirigido por:

Ph.D. ALEXANDER MOLINA CABRERA



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA

2016

Nota de Aceptación:

Aprobado por el Comité Curricular del Programa de Ingeniería Eléctrica en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Tecnológica de Pereira para optar al título de Ingeniero Electricista.

Firma del Presidente del Jurado

Firma Jurado

Firma Jurado

Pereira, junio de 2016

AGRADECIMIENTOS:

La familia con fortaleza, lazos sólidos y fuertes son las que alcanzan con mayor gratitud sus objetivos gozando de los beneficios de crecimiento personal en grupo. me siento privilegiado por dedicarme su apoyo incondicional, por contar con una familia que me ha respaldado ante la manera que los retos de la vida se me han hecho presente, estas personas hacen de este nuevo objetivo grandes benefactores mis padres, mis hermanos y mis hijos, esos pequeños retratos que han sido de gran apoyo en este arduo recorrido lleno de obstáculos que se convierten más adelante en una gran fortaleza, mis hijos mi principal motivación hacia el avance de mi desarrollo profesional y hacerme sentir importante para ustedes han destinado de su tiempo para brindarme aportes invaluable los cuales me han de servir para toda la vida.

Como olvidar a una mano amiga que sin dudas y con gran empeño me ha guiado durante el desarrollo de esta tesis, Quiero agradecer a mi asesor de tesis (MOLINA) quien compartiendo sus experiencias, su tiempo, sus ideas logra mejorar ésta grandiosa propuesta y convertirla en un éxito. Gracias por su esfuerzo y dedicación incondicional

Gracias a todos por hacer de este sueño que vemos hoy materializado.

Alexander Rodríguez

Ante todo, le agradezco a nuestro Señor todo poderoso, que puso a tantas personas en mi camino que me ayudaron a culminar este gran logro, me dio la fortaleza de no decaer a pesar de los obstáculos que se me presentaron, en esta meta que me fue tan esquiva durante tantos años. A mis padres, piedra angular de mi formación y de mi vida, sin su incansable aliento no hubiese podido terminar esta gesta. A mis hijos que siempre fueron fuente de inspiración. Finalmente, un agradecimiento muy especial al Ph.D. Alexander Molina Cabrera, quien sin importar la ciudad o el país en el que se encontrará nos orientó para que no sucumbiéramos y finalizar con nuestra meta.

Bernardo Pérez

ÍNDICE DE CONTENIDO

Introducción

Capítulo 1. Estabilidad de Sistemas de Potencia

- 1.1. Definiciones
- 1.2. Clasificación de diferentes tipos de Estabilidad
 - 1.2.1. Estabilidad de Voltaje.
 - 1.2.2. Estabilidad Angular
 - 1.2.2.1. Estabilidad en el ángulo del rotor a pequeña perturbación (small signal stability)
 - 1.2.2.1.1. Estabilidad en pequeña señal
- 1.3. Estabilidad transiente
- 1.4. Oscilaciones Inter-área
 - 1.4.1. Descripción del sistema de estudio
 - 1.4.2. Métodos de Análisis

Capítulo 2. Sistemas de Potencia con Señales Retardadas

- 2.1. Sistemas de Área amplia o Multí-área.
- 2.2. Unidades de Medición Fasorial (PMU's).
- 2.3. WAMPAC (Wide Area Measurement Protection and Control).
- 2.4. Retardos en señales en sistemas de potencia y su modelamiento.
 - 2.4.1. Descripción de señales
 - 2.4.2. Modelamiento matemático y componentes de retardo en transmisión.
 - 2.4.3. Modelo del Retardo.
 - 2.4.3.1. Modelo PADÉ.
 - 2.4.3.2. Modelo en dominio de la frecuencia.
 - 2.4.3.3. Aproximación de PADÉ en Matlab

Capítulo 3. Modelamiento del sistema SMIB (Single Machine Infinite Bus) con retardos en señales.

- 3.1. Modelamiento del sistema SMIB.
- 3.2. Sistema SMIB con señales retardadas.
 - 3.2.1. Ecuaciones diferenciales retardadas.
 - 3.2.2. Diagrama de Bloques.

Capítulo 4. Resultados y Simulaciones

- 4.1. Sistema Kundur sin retardos.
- 4.2. Sistema Kundur con retardos.
 - 4.2.1. Variaciones en los retardos de las señales medidas
 - 4.2.2. Variaciones en los retardos de señales de control.
- 4.3. Propuesta de control con predictor para señales con retardo en la medición.

Capítulo 5. Consideraciones Finales

- 5.1. Conclusiones.
- 5.2. Futuras líneas de trabajo.

Bibliografía

Introducción

En los sistemas de potencia es cada vez más común encontrar sistemas interconectados con tendencia a un incremento en la carga de algunas áreas en el sistema de transmisión. Sin la instrumentación suficiente para medir e integrar señales de monitorización y control globales, se pueden presentar oscilaciones de baja frecuencia (0.2 – 0.8 Hz) conocidas como oscilaciones inter-área. A medida que se integran mayores volúmenes de datos y canales de comunicaciones es más frecuente observar retardos por el tiempo de propagación de estas señales. Por lo que hoy en día cobra mayor importancia no solo el amortiguamiento de este tipo de oscilaciones sino la elaboración de un sistema de Control WAMPaC capaz de predecir los retardos en el envío y/o recepción de señales globales.

A partir de 1996 con la introducción del primer dispositivo PMU [1] el desarrollo de estos dispositivos ha llevado a la aplicación de esquemas de control capaces de recibir señales locales para amortiguar modos locales y modos inter-área basados en la predicción y compensación de retardos. Sin embargo, aún hoy en día, algunos controladores no consideran el efecto de los tiempos de retardo y no se calculan márgenes de retardo de los mismos los cuales deben ser tenidos en cuenta para la operación de un WADC en un sistema de potencia real.

Este proyecto pretende investigar esquemas de control básicos y avanzados que permitan analizar la estabilidad de un sistema teniendo en cuenta los mencionados tiempos de retardo. Además, proponer el caso SISO para un modelo de barra infinita de un sistema de potencia, la idea general es mostrar un posible esquema de control, que permita llevar al sistema a alcanzar estabilidad en presencia de una señal de comunicaciones con retardo.

Estabilidad en Sistemas de Potencia

Para poder entender el impacto y tratamiento detallado que se le debe dar al retardo en los WAMCS es primordial entender el problema de estabilidad en los Sistemas de Potencia. En razón a esto, se presenta una introducción general a dicho inconveniente incluyendo conceptos físicos, clasificación y definición de términos relacionados. El análisis de configuraciones de sistemas de potencia primarios por medio de modelos idealizados ilustra algunas de las propiedades de estabilidad fundamentales de los sistemas de energía. El objetivo es proporcionar una visión general de los fenómenos de estabilidad del sistema y sentar un cimiento basado en el razonamiento físico relativamente simple.

1.1. Definiciones

La estabilidad de un sistema de potencia puede definirse en términos generales como la propiedad de un sistema de potencia que le permite a este mantenerse en un estado de equilibrio bajo condiciones normales de funcionamiento y recuperar un estado aceptable de equilibrio después de ser sometido a una perturbación, tales como: desconexión imprevista de unidades generadoras, sobre carga o corte de circuitos de transmisión, cambio abrupto de la carga, entre otros.

La inestabilidad en un sistema de potencia se puede manifestar de variadas y diferentes formas dependiendo de la configuración del sistema y modo de funcionamiento del mismo. Tradicionalmente, el problema de la estabilidad ha sido uno, mantener el funcionamiento sincronizado. Dado que los sistemas de potencia se basan en máquinas síncronas para la generación de energía eléctrica, una condición necesaria para el funcionamiento satisfactorio del sistema es que todas las máquinas síncronas permanezcan en sincronismo o coloquialmente, "en paso" (in step). Este aspecto de la estabilidad se ve influenciado por la dinámica de los ángulos de rotor del generador y las relaciones de potencia ángulo.

La inestabilidad también puede encontrarse sin pérdida de sincronismo. Por ejemplo, un sistema que consta de un generador síncrono alimentando una carga de un motor de inducción a través de una línea de transmisión puede llegar a ser inestable debido al colapso de la tensión de carga. El mantenimiento del sincronismo no es un problema en este caso; en su lugar, la preocupación es la estabilidad y el control de voltaje. Esta forma de inestabilidad también puede ocurrir en las cargas que cubren una amplia área suministrada por un sistema de área amplia, que es donde se enfocará el análisis.

En la evaluación de la estabilidad, la preocupación principal es el comportamiento del sistema de potencia cuando este es sometido a una perturbación transitoria. La alteración puede ser pequeña o grande. Las pequeñas alteraciones en la forma de cambios de carga se llevan a cabo continuamente y el sistema se ajusta a las condiciones cambiantes. El sistema debe ser capaz de funcionar satisfactoriamente en esas condiciones y suministrar con éxito la cantidad máxima de carga. También debe ser capaz de sobrevivir a numerosas perturbaciones de carácter grave, tales como: un cortocircuito en una línea de transmisión, la pérdida de un gran generador o carga, o la pérdida de la línea de interconexión entre dos subestaciones. La respuesta del sistema frente a una perturbación depende en gran parte del equipamiento. Por ejemplo, un corto circuito en un elemento crítico seguido de su aislamiento mediante relés de protección, causará variaciones en: transferencias de potencia, velocidades del rotor de la máquina y en las tensiones de barra; las variaciones de tensión accionarán los reguladores de voltaje tanto del sistema del generador como el de transmisión; las variaciones de velocidad accionarán los gobernadores motor primario; los cambios de cargas en las líneas de interconexión podría accionar los controles de generación; los cambios en voltaje y frecuencia afectarán las cargas en el sistema en mayor o menor grado dependiendo de sus características individuales. Además, los dispositivos utilizados para proteger el equipamiento individual pueden responder a las variaciones en las variables del sistema y por lo tanto afectar al rendimiento del sistema. En cualquier situación dada, sin embargo, la respuesta de sólo una cantidad limitada de equipamiento puede ser significativa. Por lo tanto, muchas suposiciones se hacen generalmente para simplificar el problema y centrarse en los factores que influyen en el tipo específico de problema de estabilidad. La comprensión de los problemas de estabilidad se ve facilitada en gran medida por la clasificación de la estabilidad en varias categorías.

A continuación, se enunciarán los diferentes tipos de inestabilidad, con el fin de identificar este efecto en los sistemas de potencia. En el análisis de este tipo de sistemas se utilizan

modelos idealizados para ayudar a identificar las propiedades fundamentales de cada tipo de problema de estabilidad.

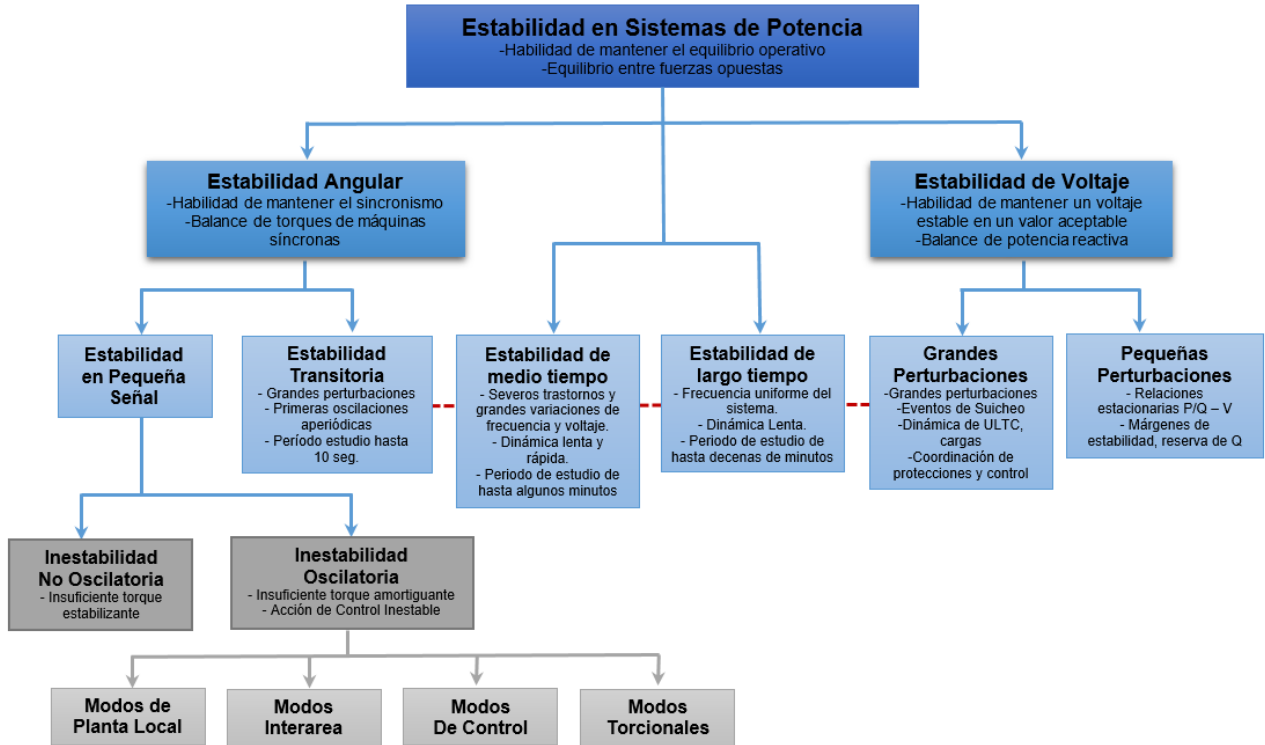
1.2. Clasificación de diferentes tipos de Estabilidad

Tal como se ha mencionado anteriormente, el concepto de estabilidad está ligado con la respuesta del sistema después de ocurrida una perturbación y la forma como este se recupera a una nueva posición de equilibrio. En términos generales, la estabilidad se puede clasificar en estabilidad angular, estabilidad de tensión y estabilidad de frecuencia. En la figura 1, se pueden observar estos diferentes tipos. Para el análisis de competencia fijado en el impacto del retardo en las señales en WAMCS de este estudio, filtraremos las diferentes clasificaciones, hasta centrarnos en la Inestabilidad Oscilatoria que es finalmente en la que se hallan los diferentes modos Interárea objetivo fundamental de este análisis. No obstante, la inestabilidad puede tomar diferentes formas y puede ser influenciada por un amplio rango de factores los cuales se enunciarán y se presentarán para facilitar la clasificación de estabilidad en apropiadas categorías. Se han tomado como base las siguientes consideraciones:

- La naturaleza física de la inestabilidad resultante, La cual se divide en:
 - Estabilidad angular.
 - Estabilidad de tensión.
 - Estabilidad de frecuencia.
- La magnitud de la perturbación considerada.
 - Pequeña perturbación.
 - Gran perturbación.
- Los dispositivos, procesos, y el lapso que debe ser tomado en cuenta para evaluar la estabilidad:
 - Período corto
 - Período largo.
- Finalmente, el método más apropiado de cálculo y predicción de estabilidad.

Figura 1

Resumen Clasificación de Estabilidad



Enfocados entonces, en el caso de estudio del análisis del impacto de retardos, analizaremos la clasificación de estabilidad en la categoría de naturaleza física resultante, con sus diferentes categorías, clases y subclases hasta llegar a la Oscilación Inter-área tema final del presente capítulo.

1.2.1. Estabilidad de Voltaje

La estabilidad de tensión se relaciona con la aptitud de un Sistema Eléctrico de Potencia de mantener valores estacionarios aceptables de tensión en todos los puntos del sistema, lo que significa que existe un adecuado balance entre la potencia reactiva consumida y la generada.

1.2.2. Estabilidad Angular

Este tipo de estabilidad se relaciona con la capacidad de un Sistema de Potencia en que las máquinas sincrónicas mantengan su sincronismo al no haber perturbaciones y se recuperen hacia una posición de equilibrio después de ser sometido a cualquier perturbación. El concepto de sincronismo significa que la diferencia angular entre los ejes eléctricos de los rotores de las máquinas sincrónicas tiende a un valor constante, después que es eliminada la perturbación, así como que la frecuencia alcanza un valor constante después de un período oscilatorio amortiguado.

Estabilidad en pequeña señal (pequeñas perturbaciones): es la habilidad del sistema de mantener el sincronismo bajo pequeñas perturbaciones. Dichas perturbaciones ocurren continuamente en el sistema debido a pequeñas variaciones en la carga y generación. Estas perturbaciones son consideradas suficientemente pequeñas para la linealización del sistema de ecuaciones siendo permisibles para propósitos de análisis, razón por la cual, se puede relacionar el concepto de perturbación de pequeña señal con el de linealidad.

La inestabilidad puede resultar de dos diferentes formas: (i) Un continuo aumento en el ángulo rotacional debido a la carencia de suficiente torque sincronizante, (ii) oscilaciones del rotor de amplitud creciente debido a la falta de un torque de amortiguación adecuado. La naturaleza del sistema a pequeñas alteraciones depende de varios factores, entre ellos: la condición inicial operativa, la fortaleza del sistema de transmisión y el tipo de controles empleados en la excitación del generador. Donde, las oscilaciones de modo de control son asociadas con las unidades generadores y otros controles. Los tiempos usuales de estudio de estabilidad en pequeña perturbación oscilan en las decenas de segundos ocurrida la perturbación.

Tal como se ha venido ilustrando, en el enfoque del estudio nos centraremos ya en esta subclase de Inestabilidad Oscilatoria, puesto que inestabilidad la No Oscilatoria es causada por la carencia de suficiente torque sincronizante, la cual podría ser corregida fácilmente con la implementación de reguladores automáticos de voltaje.

Aclarado lo anterior, se explica que, en la práctica actual de los sistemas de potencia, la estabilidad ante perturbaciones pequeñas es en gran parte un problema de insuficiente torque de amortiguamiento de las oscilaciones. De manera que se hace muy importante entender la estabilidad de los siguientes tipos de oscilaciones:

- **Modos Locales o Modos Maquina-Sistema:** están asociados con la estabilidad de unidades a una estación de generación con respecto al resto de sistemas de potencia. El término local es usado debido a que las oscilaciones son localizadas en una estación o una parte pequeña del sistema de potencia.
- **Modos de Control:** Son asociados con unidades generadoras y otros controles. Pobremente ajustados los excitadores, gobernadores de velocidad, convertidores HVDC, Compensadores estáticos de Potencia Reactiva, son las causas usuales de Inestabilidad de este modo de inestabilidad.
- **Modos Torsionales:** estos son asociados con los componentes rotacionales del eje del sistema turbina generador. Los modos de inestabilidad torsional pueden ser causados por la interacción con controles de excitación, gobernadores de velocidad, controles HVDC y líneas compensadas con capacitor serie.
- **Modos Inter-área:** estos modos con asociados con la oscilación de algunas máquinas en una parte del sistema contra máquinas en otras partes. Estos son causados por dos o más grupos de máquinas muy cercanamente acopladas siendo interconectadas por débiles líneas. El problema de inestabilidad global es causado por la interacción entre grandes grupos de generadores y produce efectos generalizados. Estos involucran oscilaciones de un grupo de generadores en un área balanceada contra un grupo de generadores en otra área.

1.3. Estabilidad Transiente de frecuencia

La Estabilidad Transiente o transitoria como también se le conoce, se relaciona con el comportamiento del Sistema de Potencia con respecto a un cambio brusco en las condiciones de red como lo podría ser un caso de Corto Circuito. Para poder realizar un estudio de dicha estabilidad uno de los métodos generalmente usado, consiste en determinar la evolución del rotor de cada máquina mediante una integración paso a paso de las ecuaciones diferenciales no lineales del sistema. Si las diferencias de los ángulos tienden a hacerse constantes después de algunos ciclos de despejada la falla, se diagnostica que el sistema es estable. La evolución del sistema potencia queda enteramente definida por los parámetros eléctricos de la red, los parámetros eléctricos y mecánicos de las máquinas y la condición relativa de éstos (ángulos y velocidades) en el instante en que se elimina la perturbación. Todos estos análisis han encaminado la búsqueda en modelos matemáticos que realicen un diagnóstico del sistema.

De la misma manera como, se ha reseñado que el análisis de estabilidad transiente se hace en función de las diferencias de los ángulos de cada máquina con respecto a una de ellas como

referencia; lo que en verdad importa es el movimiento estable del grupo de ellas, antes que las contingencias inicien su ejecución dando como consecuencia la operación permanente a frecuencia nominal. El estado estable se obtiene si las diferencias de los ángulos se mantienen constantes o casi constantes, sin importar si las velocidades son diferentes a la síncrona y las aceleraciones no son nulas.

Pueden distinguirse cuatro variantes en esta estabilidad, a saber:

- Estabilidad asintótica de n máquinas, tomadas por separado, que retornan al sincronismo después de eliminar la perturbación.
- Estabilidad simple de n máquinas, tomadas por separado, que oscilan levemente en torno a la condición de sincronismo.
- Estabilidad asintótica del conjunto de n máquinas, en que todas las máquinas se sincronizan a una frecuencia que puede ser distinta de la nominal.
- Estabilidad simple del conjunto de n máquinas.

1.4 Oscilaciones Inter-Área

Con el fin de entender cuál es la naturaleza de las diferentes oscilaciones Inter-área y sus diferentes modos, es necesario entender los efectos de la estructura del sistema, el modelado del generador, el tipo de excitación y las cargas del sistema, como se mostrará en esta sección. En el estudio de ambos análisis: pequeña señal y estabilidad transitoria se utilizan para determinar las características del sistema.

Hay que realizar una aclaración inicial con respecto al término “Tie Line” el cual difiere de “Transmission Line” el cual como conocemos, consiste en transmitir potencia a partir de una fuente a otra, (Envío final y recepción final). “Tie Line” que llamaremos desde ahora “Línea de Interconexión” es un tipo de transmisión vuelta de vuelta, llamada sincronización, (hoy en día la sincronización más popular es por medio de HVDC).

La única diferencia principal, radica en que el flujo de energía en una transmisión fija, es decir, del envío en el extremo (fuente) al extremo receptor (carga). El flujo de energía en una Línea de Interconexión fluirá en ambas direcciones en tanto las fuentes estén sincronizadas.

Las oscilaciones electro-mecánicas entre los generadores síncronos interconectados son fenómenos inherentes a los Sistemas de Potencia. La estabilidad de estas oscilaciones es de vital importancia, y es un requisito previo para el funcionamiento seguro del sistema. Durante muchos años, las oscilaciones observadas han sido un problema en los sistemas eléctricos, se asociaron con un solo generador, o un grupo de unidades muy estrechamente conectados en una planta de generación. Algunas oscilaciones inestables de baja frecuencia, también se observaron cuando grandes sistemas estaban conectados por líneas de unión relativamente débiles, y los métodos especiales de control se utilizaron para estabilizar el sistema interconectado. Se encontraron estos modos de baja frecuencia para involucrar grupos de generadores, o plantas de generación, en un lado de lazo oscilante contra grupos de generadores en el otro lado del lazo.

Las oscilaciones asociadas con un solo generador o una sola planta se llaman modos locales, o modos de plantas. Los modos locales normalmente tienen frecuencias en el rango de 0,7 a 2,0 Hz. Las características de estas oscilaciones son bien conocidas. Ellos pueden ser estudiados adecuadamente, y solucionar satisfactoriamente los problemas de estabilidad desarrollados, de un el cual sistema ha detallado representación sólo en el entorno de la planta.

Las oscilaciones asociadas con grupos de generadores, o grupos de plantas, se llaman modos inter-área. Los modos inter-área tienen frecuencias en el rango de 0,1 a 0,8 Hz. Las características de estos modos de oscilación, y los factores que influyen en ellas, no se entienden completamente. Ellas son mucho más complejas para estudiar y controlar. Generalmente, se requiere una representación detallada de todo el sistema interconectado para estudiar los modos inter-área.

En los últimos tiempos, muchos casos de oscilaciones inestables, implican modos inter-área en grandes sistemas de potencia, se han observado, tanto en los estudios como en la práctica. Tales oscilaciones se han incrementado cada vez más, llegando a ser una causa de preocupación. Esto ha llevado a un interés renovado en la naturaleza de estos modos, los métodos para el estudio sistemático de los mismos, y métodos de control por los que se puede estabilizar. La Asociación Canadiense de Electricidad financio un proyecto de investigación, en Ontario Hydro, con el objetivo de hacer frente a estos intereses. Los objetivos de la investigación eran: determinar la naturaleza fundamental de la baja frecuencia en los modos inter-área de oscilación, desarrollar técnicas de análisis para grandes sistemas de potencia, desarrollar métodos para el modelado de sistemas de orden reducido, y desarrollar procedimientos para diseñar y modificar sistemas de control.

Los resultados de la primera fase de la investigación, en la naturaleza fundamental de las oscilaciones inter-área, se presentan a continuación. En particular, se ocupó de los efectos de los siguientes elementos en las oscilaciones inter-área:

- Estructura del sistema
- Condiciones de operación
- Sistemas de excitación
- Cargas del sistema
- Enlaces CC

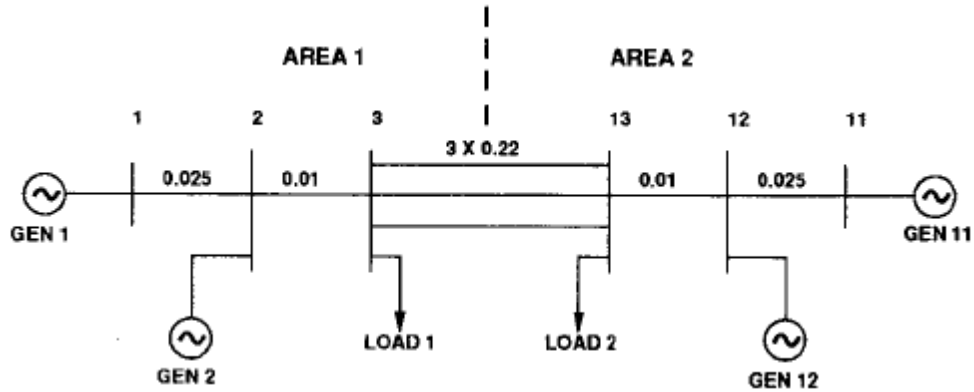
1.4.1. Descripción del sistema de estudio.

Las oscilaciones inter-áreas en grandes sistemas interconectados son complejas. En general, existen muchos de estos modos, donde participan un gran número de generadores. La complejidad de los modelos de sistemas necesarios para determinar la estabilidad de los sistemas de potencia específicos, oscurece la naturaleza fundamental de los modos inter-área. Por lo tanto, con el fin de ser capaz de concentrarse en aquellos factores que afectan modos inter-área, se ha construido un sistema simple hipotético, que se muestra en la Figura 2, que tiene tanto inter-área y modos locales. Aunque pequeño, los parámetros del sistema, y la estructura es realista. El sistema es particularmente útil para estudios paramétricos.

El sistema base es simétrico; consta de dos áreas idénticas conectado a través de una línea relativamente débil. Cada área incluye dos unidades generadoras con salidas iguales de potencia. La simetría completa del sistema base aclara el efecto que diversos factores tienen en el modo de inter-área. Se tomaron datos ficticios dinámicos para los generadores y sistemas de excitación utilizadas en el estudio. En la creación de los diversos flujos de potencia utilizados en los estudios, se añadieron condensadores necesarios para asegurar que el perfil de voltaje del sistema estuviese satisfactorio.

Figura 2

Sistema de Dos Áreas



Tres modos de electro-mecánico de oscilación están presentes en este sistema; dos modos inter-plantas, una en cada área, y uno entre áreas el modo de baja frecuencia, en el que las unidades generadoras en un área oscilan contra las de la otra zona.

N	Frequency (Hz)	Areas involucradas
1	0.94052	(2,3) ↔ (4,5,6,7),(9)
2	0.93778	(4,5) ↔ (6,7)
3	0.91202	(4,7) ↔ (2,3),(8,9)
4	0.59956	(10) ↔ (2,3),(4,5,6,7),(8,9)

1.4.2. Método de Análisis

Se usaron ambos análisis, de estabilidad de pequeña señal y el análisis de estabilidad transitoria, de forma complementaria, para este estudio de oscilaciones inter-área. El análisis de estabilidad de pequeña señal, utilizando técnicas modales, es el más apropiado para la determinación de la naturaleza de los modos inter-área en sistemas de potencia. En este caso, el sistema estudiado era lo suficientemente pequeño para permitir el análisis de todos los modos del sistema, usando el programa de ordenador en masa. Los valores propios del sistema, los vectores propios, y factores de participación se calcularon para un número de diferentes condiciones del sistema y configuraciones.

En algunos casos en particular, en la investigación en los efectos de las cargas, se encuentra que es útil para aumentar el análisis de estabilidad de pequeña señal con ejecución de estabilidad transitoria. La naturaleza gráfica de la salida del programa de estabilidad transitoria ayuda a representar el patrón de oscilaciones de voltaje y su relación con los vectores propios calculados mediante análisis modal.

Realizados los análisis, las pruebas descritas anteriormente y aplicando los diferentes modos se logró llegar a las diferentes conclusiones. Los resultados del estudio sobre la naturaleza fundamental de los modos inter-área de oscilación en sistemas de potencia se presentan teniendo en cuenta los diferentes elementos como se explicó para este caso de estudio.

- **Estructura del sistema**

La frecuencia natural y el amortiguamiento del modo inter-área depende de la debilidad de la línea de interconexión y la potencia transferida a través del lazo. Se esperaba que estos resultados confirman la experiencia con los sistemas grandes.

- **Modelos de generadores y tipo de excitación**

Los resultados sobre los efectos de modelado del generador, sistemas de excitación y las cargas son bastante más esclarecedor.

Bajo cero condiciones de línea de interconexión, el modo “forma” inter-área muestra claramente que, durante la oscilación, los generadores de un área fluctúan en fase opuesta con los generadores en la otra zona. Esta característica es independiente tanto de los detalles de modelado del generador y del tipo de sistema de excitación.

- **Modelos de carga**

Modelos de carga dinámica no lineales en el extremo receptor causa un efecto perjudicial sobre la amortiguación del modo inter-área, mientras que los modelos de carga similares en el extremo del emisor tienen un efecto ligeramente beneficioso. Con sistemas de excitación rápida, los efectos de carga son mucho más pequeños que con los sistemas de excitación lenta

Sistemas de Potencia con señales retardadas

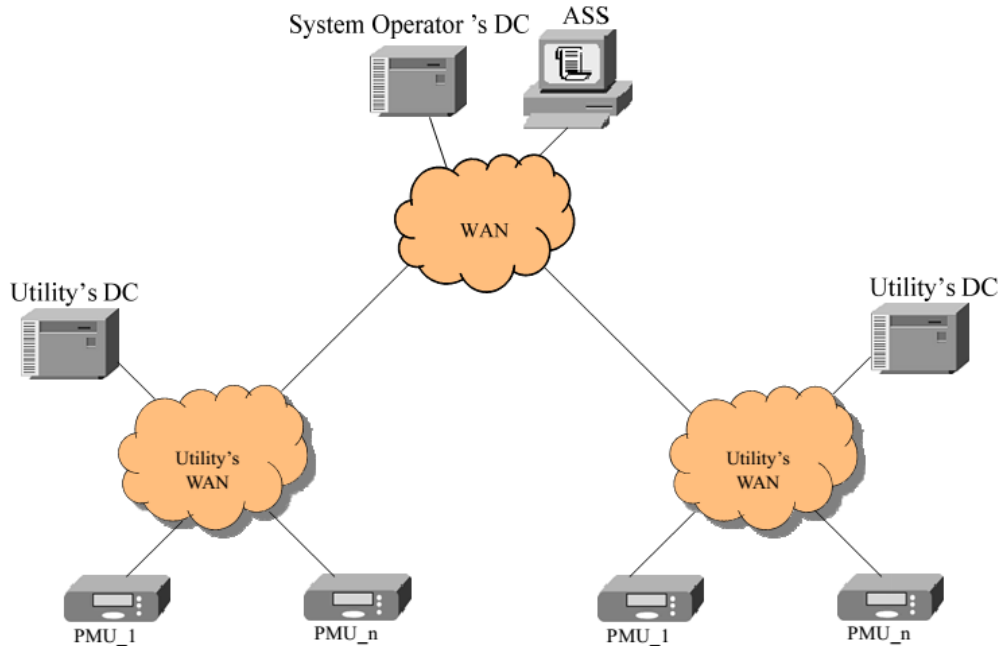
2.1. Sistemas de Área Amplia o Multí-Área

Monitoreo de Área Amplia, Protección y Control (WAMPAC, por sus siglas en inglés) implica el uso de mediciones sincronizadas de área amplia, redes de comunicaciones confiables y de gran ancho de banda y avanzados esquemas de protección y control centralizados [6]. Tecnología de Medición Sincronizada (SMT, por sus siglas en inglés) y aplicaciones relacionadas son elementos esenciales y habilitadores, de WAMPAC. En la actualidad, las unidades de medición fasorial (PMU) son la tecnología de medición sincronizada más precisa y avanzada disponible. Proporcionan información de fasores de Voltaje, corriente y sincronizados con alta precisión a un tiempo común de referencia, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Las funciones de medición de una PMU se basan en algoritmos numéricos. Estos algoritmos deben ser tanto, computacionalmente eficientes como apropiados para las aplicaciones en tiempo real, en particular cuando se utilizan las mediciones para dar soporte a aplicaciones de respuesta dinámica.

La Figura 3 muestra los principales componentes y la estructura de un sistema WAMPAC generalizada. En este sistema, necesariamente los fasores de corriente y voltaje sincronizados son producidos por las PMU's. Los datos medidos de las PMU's se transmiten a través de una red de área amplia (WAN) y se agregan a uno o más Concentradores de datos (DC's). Es entonces cuando los datos agregados, se almacenan localmente en el DC antes de ser transmitidos a distintos Softwares de Aplicaciones o Servidores (ASS) de los diferentes servicios públicos. La principal tarea realizada por el DC es la alineación de los datos recibidos del PMU; sin embargo, existe la posibilidad también en realizar tareas de pre-procesamiento adicionales antes de reenviar los datos al ASS.

Figure 3

Un Sistema Generalizado de WAMPAC.



La necesidad de los WAMPAC ha ganado aceptación en todo el mundo, y una serie de sistemas WAMPAC se han establecido o iniciado en diferentes empresas de servicios públicos en todo el mundo. Por ejemplo, un Sistema de Monitoreo Dinámico en Tiempo Real (RTDMS, por sus siglas en inglés) se ha implementado en el este de la red eléctrica de transporte de América del Norte. Un sistema de vigilancia y control de oscilaciones inter-área de área amplia fue establecido por red de potencia del Sur de China. Otros países, como Suiza, Suecia, Dinamarca, Austria y Japón, han desarrollado aplicaciones basadas en Tecnologías de Medición Sincronizada (SMT) para mejorar la estabilidad del sistema de Potencia.

2.2. Unidades de Medición Fasorial (PMU).

Mercados competitivos, el envejecimiento de las líneas de transmisión, la falta de expansión de la transmisión y las limitaciones ambientales entre otras cosas, están obligando a los sistemas de potencia a operar más cerca de sus límites y a utilizar los recursos existentes de manera más eficiente. Operar bajo estas limitaciones y seguir manteniendo una alta fiabilidad es una tarea muy difícil que requiere nuevas herramientas de área amplia en tiempo real utilizando tecnologías fasoriales y soluciones de visualización de múltiples vistas.

Sistemas de Monitoreo Control y Protección, en tiempo real de área amplia, como complemento a los sistemas SCADA y EMS, han sido propuestos por el Consorcio para Soluciones de Confiabilidad de Electricidad (CERT) y otras organizaciones durante la última década y han emergido por todo el mundo. Tecnologías fasoriales, que van desde un nuevo hardware, comunicaciones de datos, software de aplicación y contingencias en tiempo real

basados en paradigmas del monitoreo están siendo investigados y prototipados para responder a la desafiante misión operacional.

Las mediciones fasoriales se han desarrollado tanto en el laboratorio como en el campo y se han utilizado en los últimos 30 años. El dispositivo de medición final resultante es la Unidad de Medición Fasorial (PMU, por sus siglas en inglés). Su capacidad de alta precisión, velocidad de respuesta y la sincronización de tiempo hacen a las PMUs como unas herramientas muy apropiadas para gestionar los sistemas área amplia en estado estacionario y el monitoreo de estabilidad para las coordinaciones de confiabilidad, así como para la protección y control. Un dispositivo adicional, como lo es el Concentrador de Datos Fasoriales (PDC, por sus siglas en inglés) ha estado en desarrollo y es un dispositivo multi-CPU que permite la recopilación, concentración, correlación y sincronización de datos fasoriales de diferentes PMUs y de otros PDCs. Recientes arquitecturas de base informática interconectadas a través de redes de área amplia, utilizan datos de PMUs y de bases de datos archivados y se están convirtiendo en nuevas soluciones rentables y ya están disponibles comercialmente.

Entendiendo lo anterior, debemos consolidar el concepto de Unidad de Medición Fasorial (PMU), como un dispositivo que tiene la capacidad de medir variables fasoriales (magnitud y ángulo de fase) de corriente y voltaje en una red eléctrica, al igual que su frecuencia, ya que dichas variables son la base fundamental del análisis de los sistemas de corriente alterna, garantizando sincronización en las medidas y una alta tasa de muestreo que permite una visualización en tiempo real del sistema, siendo un factor clave para determinar flujos de potencia y en general el estado del sistema.

Las PMUs son una pieza fundamental de los elementos del hardware de la tecnología sincronizada de fasores, donde se identifica una estructura interna construida por varios bloques como se puede observar en la figura 1. La arquitectura principal consiste en:

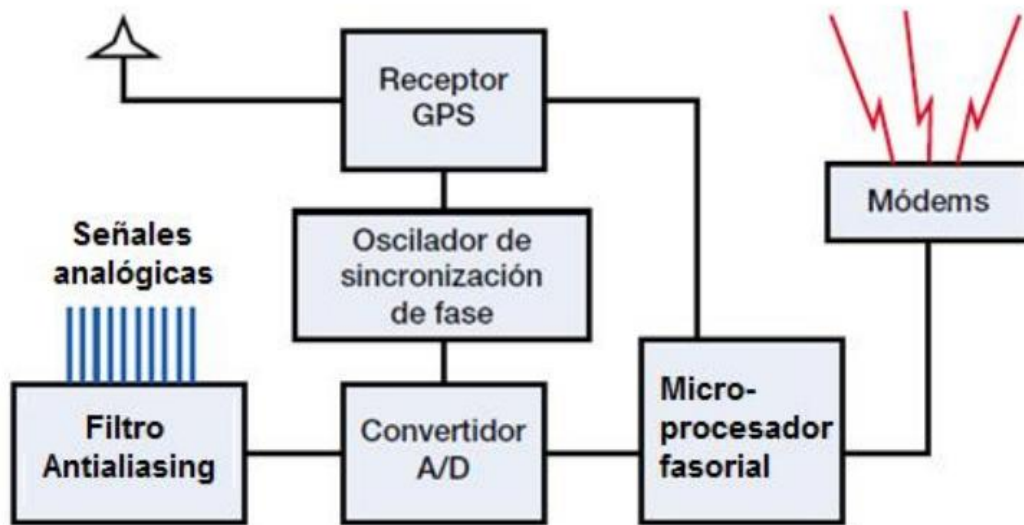
- **Entradas análogas:** estas se toman de los devanados secundarios de los transformadores de corriente y voltaje.
- **Receptor GPS:** es el encargado de recibir la señal de sincronismo y determina los desfases del sistema, con la cual se puede obtener la señal de un *pulso por segundo* que envían los satélites del sistema de posicionamiento global para sincronizar todos los receptores del planeta con la hora UTC (Universal Time Coordinated) con una precisión que puede estar debajo de 1 microsegundo.
- **Modem:** realiza el envío de los datos hacia el centro de control para que estos sean procesados.

El perfeccionamiento del sistema con esta clase de dispositivos, teniendo en cuenta la capacidad de medir fasores y determinar los desfases, permite que todas las PMU del sistema posean las mismas referencias de tiempo lo que hace posible construir una *etiqueta de tiempo*

para cada uno de los datos tomados por cada PMU del sistema y realizar las acciones de control necesarias para la óptima operación del sistema.

Figura 4

Esquema básico de una PMU



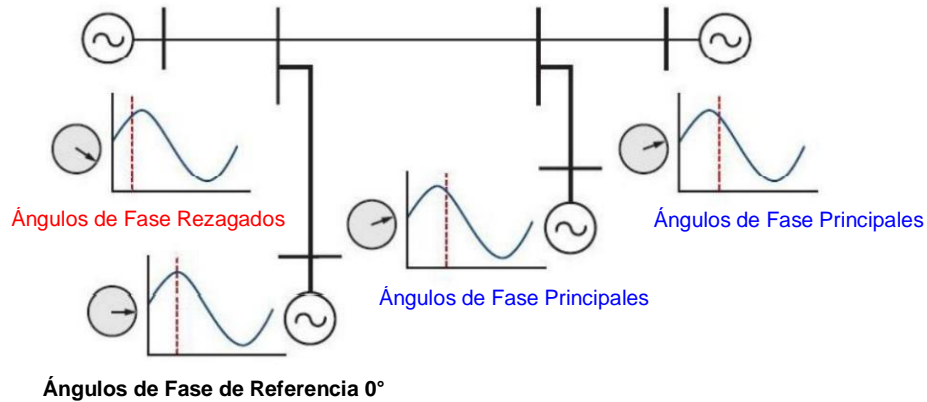
2.2.1. Proceso de Medición sincrofásorial

El primer paso en este proceso inicia con la lectura de datos por parte de una PMU en un punto al cual se le asocia una etiqueta de tiempo con toda la información asociada en el momento que se produjo. Este mismo paso se está realizando simultáneamente en diferentes lugares del sistema, cada PMU tienen un código de identificación que las diferencia de las demás, lo que hace que cada vez que llega un dato, el receptor sabe de dónde proviene y cómo lo debe almacenar. Posteriormente dichas señales se comparan con una señal de referencia. Las señales de voltajes y frecuencias se comparan para producir las medidas del sincrofásor, el cual se define con respecto a una onda coseno con frecuencia igual a la nominal del sistema y sincronizando a UTC. Finalmente, los datos son enviados a través de canales a un sitio central conocido como Concentrador de Datos (PDC) el cual se encargará de hacer el procesamiento por medio de software especializado, como se explicará más adelante.

La toma de datos sincronizadas a través de PMU's en diferentes sitios en el sistema de potencia, entrega una idea momentánea del comportamiento, en tiempo real y de lo que está pasando en un lugar específico con respecto a la referencia o a los límites que se hayan predeterminado. Medidas fasoriales adquiridas en diferentes puntos del sistema exactamente en el mismo instante, permite visualizar la diferencia angular entre diferentes puntos de la

red. Para ilustrar un poco lo anterior podemos observar la Figura 2, en la cual se presentan los diferentes ángulos de fase que se podrían encontrar en un sistema.

Figura 5
Tecnología de Medición Fasorial



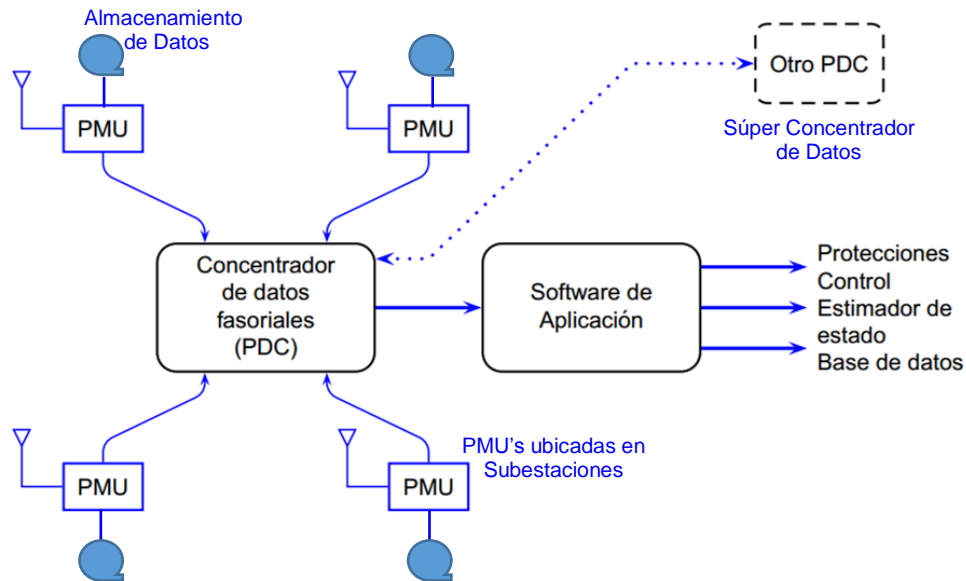
2.2.2. Concentrador de datos.

Tal como lo notamos anteriormente en la sección del proceso de medición sincrofasorial, el Concentrador de Datos (PDC, Phase Data Concentrator), fundamentalmente es un procesador de comunicación basado en microprocesadores, encargado de recibir y almacenar los datos provenientes de las PMU, procesándolos de forma que realiza funciones como: alinear las banderas de tiempo, revisa la calidad de datos, rechazar datos corruptos y crear un registro coherente de los datos recibidos simultáneamente del sistema. En el concentrador de datos se guarda la información asociada recibida para tenerla disponible en el momento que se requiera, bien sea para análisis posterior de comportamientos históricos del sistema o para estudiar eventos que pudiesen presentarse, debido a que el PDC cuenta con cierto número de salidas especializadas lo que permite acoplarlo a un sistema SCADA o a un sistema EMS (Energy Management System), con los cuales se puede realizar virtualmente cualquier análisis, cálculo o visualización de variables como: frecuencias, potencias, voltajes, entre otras.

Una configuración básica de un sistema de referencia se puede observar en la Figura 4, donde se aprecia que las PMU's se ubican en subestaciones que pueden estar a grandes distancias unas de otras, las cuales envían los datos tomados de las PMU's y se dirigen hacia un concentrador de datos local y de allí hacia el PDC principal o conocido en alguna literatura como Súper PDC.

Figura 6

Estructura de un sistema de monitoreo basado en PMU



Se debe implementar una red muy robusta para la transmisión, almacenamiento y procesamiento de los datos, ya que el flujo de ellos ocupará una gran parte de la red y tenderá a saturarla, debido a que la tasa de envío desde la PMU, para sistemas de 60 Hz, puede llegar a las 30 muestras por segundo, lo cual en un mes nos generará aproximadamente unos 3.73GB por cada medidor. Entonces se deben tomar las medidas necesarias en redundancia y confiabilidad con el fin de evitar pérdidas de datos por limitaciones de capacidad en las líneas de comunicación.

Aunque la tecnología de WAMS/WACS basadas en PMU's se ha implementado en muchos países bajo diferentes aplicaciones dependiendo de la necesidad específica de cada sistema de potencia, incluyendo Colombia bajo el Proyecto SIRENA; el estado del arte y su implementación aún está en investigación y continuo desarrollo. Las PMU's pueden crear aplicativos con variados usos tales como: Medición de frecuencia y magnitud de fasores, estimación de estado, predicción de inestabilidad, sistemas de control mejorado, esquemas especiales de protección, análisis de contingencias, estudios de estabilidad transitoria, entre otros.

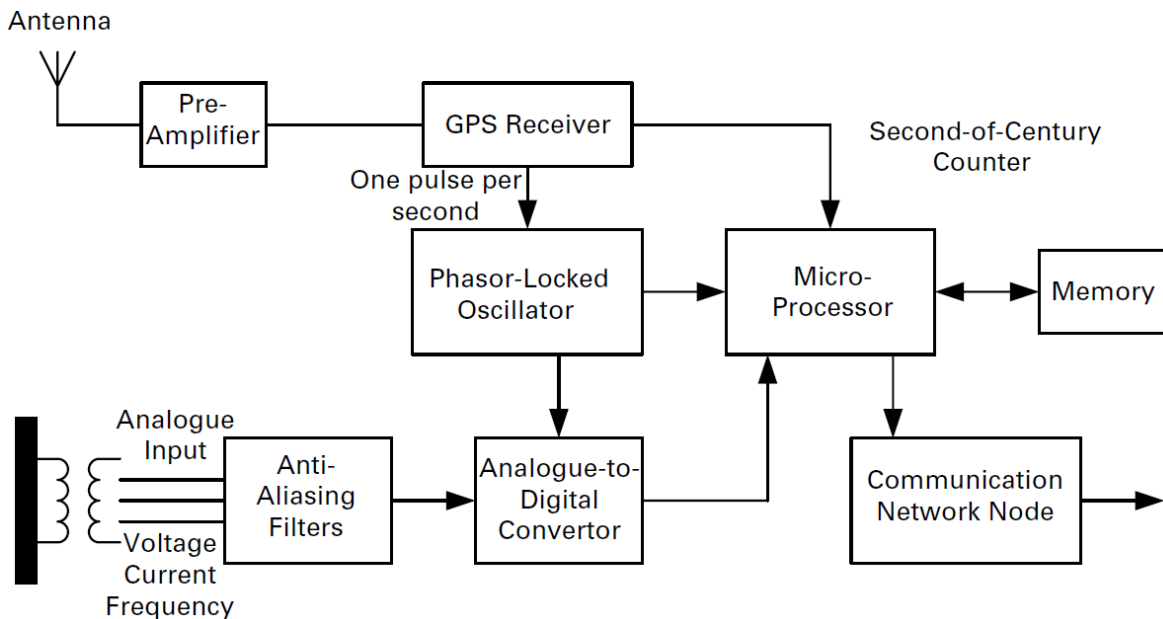
2.2.3. Implementación completa del sistema de medición.

En general el sistema de medición puede ser implementado con los componentes antes mencionados. Ahora, cada uno de esos componentes agrega desplazamientos en el tiempo,

retardos y dificultades a pesar que los elementos involucrados efectúen un procesamiento adecuado de la señal. En ese sentido se ilustra en la siguiente gráfica

Figura 7

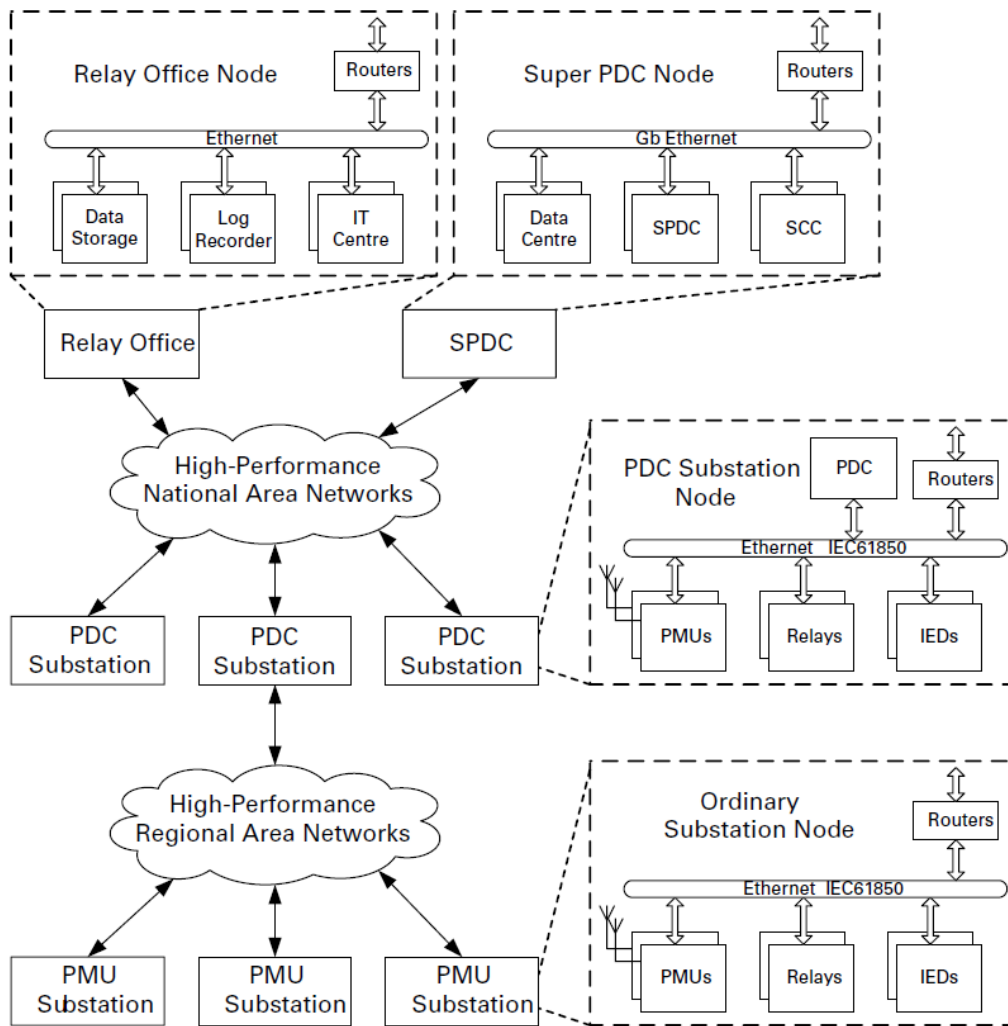
Estructura de un sistema de monitoreo basado en PMU



Ahora, en lo que tiene que ver con la arquitectura de hardware es preciso comentar que se genera una configuración que integra los medidores en cada una de las subestaciones, medidores en otras subestaciones alternas y los concentradores fasoriales o denominados PDC. En este sentido, es posible encontrar concentradores fasoriales en una subestación o en un centro de control que integra, como ya se ha mencionado, varias mediciones fasoriales.

Estas mediciones tienen que ver con la forma en la que toman las señales para enviarlas a centros de cómputo o centros de control que posteriormente usan sus valores para efectuar los controles correspondientes. En la siguiente gráfica se ilustra la forma en la que se dispone la arquitectura para hacer viable éste tipo de esquemas de comunicación.

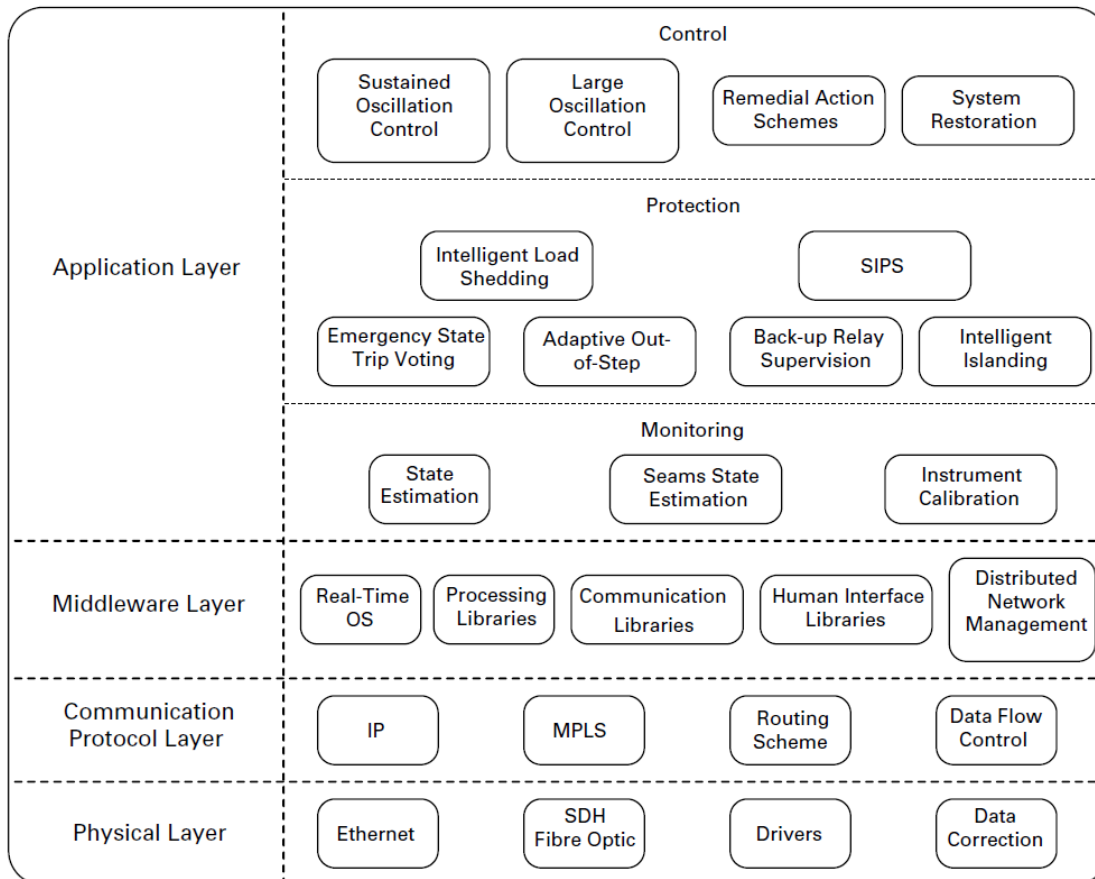
Figura 7
Infraestructura de hardware



De la anterior arquitectura se desprende el hecho de una construcción de infraestructura de software que responde a las necesidades y diferentes aplicaciones de los sistemas de control.

Los desarrollos anteriores permiten inequívocamente hablar de una estructura de software para cumplir con requerimientos como los de medición, los de procesamiento local de información, procesamiento global de información, procesamiento de parámetros y cálculo de señales para el control de los procesos. Así mismo, estas etapas involucran las posibilidades de control de forma inteligente y adaptativo para las aplicaciones modernas necesarias en los sistemas eléctricos.

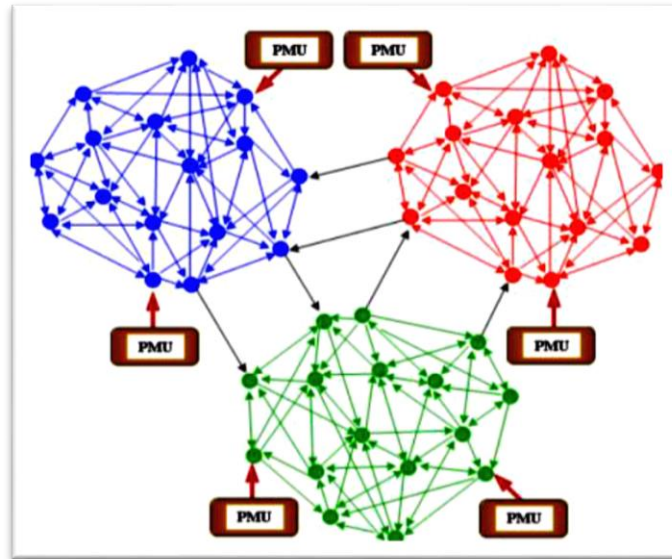
Figura 7
 Infraestructura de software



2.3. WAMPAC (Wide Area Measurement Protection And Control)

El concepto de WAMS – Wide Area Monitor System- surge gracias a la necesidad y los retos que tenía la industria después de enfrentar distintos eventos de black-out. Además, la necesidad de tener sistemas automáticos y adaptativos que permiten monitorear y analizar en tiempo real el sistema en una amplia área geográfica para accionar esquemas de control y protección altamente precisas contra fenómenos de perturbación y fallas catastróficas que requieren acciones instantáneas.

Figura 7
Ilustración de un Sistema WAMS



La razón de la existencia de este esquema de monitorización fue la introducción de los PMU, dispositivos que mejoraron la observabilidad de parámetros dinámicos del sistema de potencia; a diferencia de los sistemas SCADA. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las diferencias entre ambas tecnologías:

Tabla 1
Diferencias entre tecnología PMU y SCADA

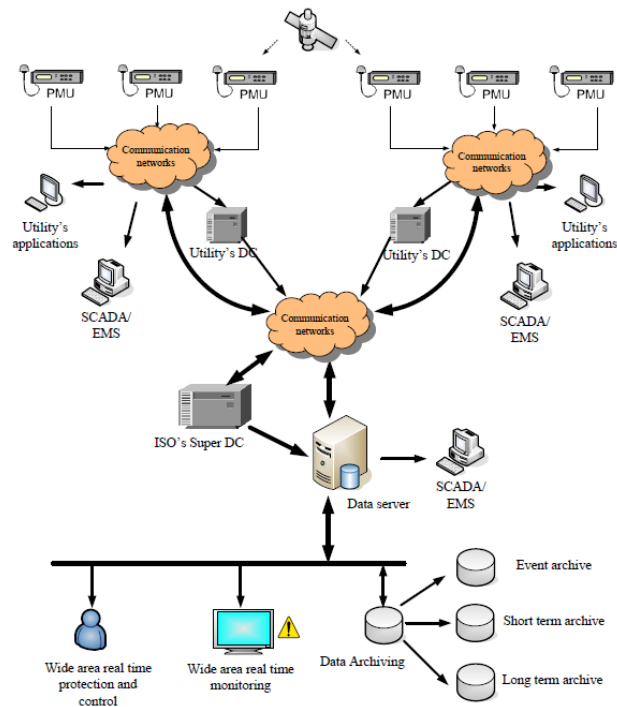
SCADA	PMU
<p>Una muestra cada ciertos segundos. Baja velocidad de adquisición de datos.</p>	<p>Alta velocidad de adquisición de datos etiquetados (30+ Hz) temporalmente y sincronizados mediante GPS</p>
<p>Tiene capacidad de registrar respuestas estables (no transitorias)</p>	<p>Posibilidades de obtener repuestas transientes (dinámicas)</p>
	<p>Base de datos en tiempo real con información histórica que soporta gran cantidad de datos.</p>

De manera, que la operación de esta tecnología combina software EMS (Energy Management System), tecnología PMU, rápido procesamiento y una red de comunicaciones y datos sobre el sistema de información. Los datos capturados por los PMU en las subestaciones son llevados para posteriores usos a un PDC (Phasor Data Concentrator) donde la información es transportada a un centro de control para propósitos de administración del sistema. Del mismo modo, WAMS puede realizar simulaciones online para análisis de frecuencia y voltaje, identificación de disturbios y comparación de resultados con las curvas obtenidas mediante los instrumentos de medición. A continuación, se destacan otros sistemas que complementan la función de monitoreo.

- WASS es un sistema que se encarga de realizar análisis de estabilidad transitoria, pequeña señal, estabilidad de frecuencia, transientes en voltaje, estabilidad de voltaje en estado estable, oscilaciones sub-síncronas y oscilaciones de baja frecuencia. Es posible determinar la capacidad de transferencia en tiempo real y analizar riesgos de contingencia en cascada.
- WACS tiene la función de optimizar la estrategia de control, lo que significa que el sistema de comunicaciones debe ser muy rápido y confiable. Aquí es donde los retardos de tiempo e incertidumbre deben ser reducidos al máximo.

La combinación de los tres sistemas anteriores produce lo que se llama un sistema WAMPAC (*Wide Area Monitoring, Protection and Control*). Este sistema se encuentra aún en desarrollo y lo mismo para el sistema de comunicaciones que debe soportar este sistema de manera que la arquitectura se toma a partir de una implementación realizada en EEUU.

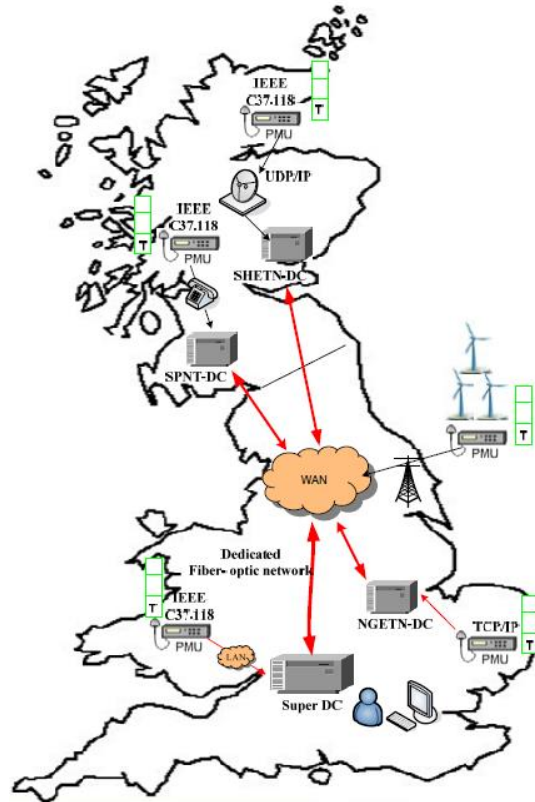
Figura 8
Arquitectura general de un Sistema WAMPAC



Algunos hallazgos acerca del impacto en sistemas de potencia pueden verse ilustrados en la Tesis Doctoral del año 2012, de Cai, Deyu “*Wide Area Monitoring, Protection and Control in the Future Great Britain Power System*”, de la Universidad de Manchester. Ésta se efectúa con el análisis de señales en una aplicación de WAMCS basado en la propuesta de una arquitectura para el sistema de potencia de Gran Bretaña que consta de una interconexión de dos áreas mediante un enlace HVDC de 500kW entre Escocia e Inglaterra. Se presenta el flujo de potencia sobre la línea que realiza el enlace y su respuesta sobre el control y la estabilidad del sistema, como se puede observar en la figura 9.

Figura 9.

Diagrama de WAMPAC en el futuro del Sistema de Potencia del Reino Unido



La necesidad de WAMPAC ha ganado aceptación en todo el mundo, y un número de Sistemas WAMPAC se han establecido, o inicializado, en diferentes empresas eléctricas alrededor del mundo. Por ejemplo, un Sistema de Control de Tiempo Dinámico Real (RTDMS) se ha implementado en la red eléctrica de transporte en los Estados Unidos; otra área de amplio monitoreo con oscilaciones inter-área bajo un sistema de control se ha establecido en la China. Países como Suiza, Suecia, Dinamarca, Austria y Japón han desarrollado aplicaciones basadas en SMT para mejorar la estabilidad del sistema de energía.

2.4 Retardos de señales en Sistemas de Potencia y su modelamiento

Los sistemas eléctricos de potencia se han caracterizado por su gran tamaño, cobertura de grandes distancias e innumerable cantidad de dispositivos que los componen tanto en funcionamiento, control y protección. Un sistema característico puede estar compuesto por quinientos nodos incluyendo más de cincuenta unidades de generación de energía de diferentes tipos. Para poder analizar el estado estacionario del anterior caso, se necesitarían alrededor de mil ecuaciones algebraicas, unas doscientas ecuaciones para analizar el

comportamiento dinámico. Es entonces muy importante realizar muy bien el modelamiento de cada uno de los elementos de estos sistemas, pues otra característica básica que comparten los sistemas de potencia es que relativamente tienen pocas interconexiones entre sus dispositivos.

En este capítulo, nos centraremos en la descripción de las señales del sistema de transmisión, pues es ahí donde los diferentes elementos del sistema interactúan y donde se puede observar los diferentes efectos ocurridos después de una perturbación mediante las alteraciones de los flujos de potencia, análisis del circuito, condiciones iniciales de operación en estado estacionario y en régimen transitorio. El retardo en una señal de control, por ejemplo, puede afectar el esquema protección del sistema, haciendo que este quede desamparado o se tome una mala decisión en el centro de control con respecto a una perturbación ocurrida.

2.4.1. Descripción de señales.

Enfocado entonces, en el estudio en las líneas de transmisión, describiremos inicialmente las características eléctricas que las constituyen al igual que las diferentes representaciones, pues es a través de ellas donde podemos observar una gran variedad de fenómenos físicos influyendo en las condiciones de operación de la red. Dichos fenómenos físicos que se presentan en las líneas (resistividad, flujos magnéticos, campos eléctricos, etc.) son modelados para así obtener un estimado de su influencia en las variables de importancia en el sistema eléctrico de potencia.

2.4.2. Características Eléctricas

Una línea de transmisión (aérea para el caso de estudio) está caracterizada por cuatro parámetros a saber: Resistencia Serie (R) debido a la resistividad del conductor; Conductancia en Paralelo (G) debido a corrientes de fuga entre fases y tierra; Inductancia Serie (L) debido al campo magnético que rodea los conductores; y Capacitancia en Paralelo (C) debido al campo eléctrico entre conductores.

- **Resistencia Serie (R):** Debido a su composición interna es la principal causa de pérdida en el transporte de la energía debido a la resistividad y longitud del material. Por otra parte, también se encuentra estrechamente afectada por el efecto piel, la temperatura y los aspectos constructivos del conductor. Los fabricantes informan de las características a través de tablas.
- **Conductancia en Paralelo (G):** La conductancia en paralelo de una línea representa las pérdidas debidas a las corrientes de fuga a lo largo de las cuerdas aislantes y coronas. Esta conductancia y su respectiva reactancia capacitiva, comúnmente se desprecian, la primera debido a que es una componente muy pequeña. Obtener los valores típicos de la conductancia en una línea usualmente es una labor complicada, debido a que las fugas en los aisladores que son la principal fuente de conductancia, variación debido a condiciones atmosféricas y a las propiedades conductoras de la mugre que se adhiere a los aisladores. De igual forma la corona que produce fugas entre las líneas varía mucho con las condiciones atmosféricas.

- **Inductancia serie (L):** Para obtener este valor se debe considerar los enlaces de flujo internos como externos en cada conductor de la línea, así como de la transposición (cada fase ocupa las tres posiciones posibles) y de la disposición geométrica de los conductores. Para su cálculo es necesario obtener la distancia media geométrica mutua (se relaciona con la disposición geométrica de los conductores) y extraer de las tablas de características del fabricante la distancia media geométrica propia (se relaciona con la disposición geométrica en el interior de cada conductor) del conductor.
- **Capacitancia en paralelo (C):** La diferencia de potencial entre los conductores de una línea hace que estos se carguen. La capacidad entre conductores es la carga por unidad de diferencia de potencial. La capacidad entre conductores paralelos es constante, dependiendo del tamaño y de la separación de los conductores. El flujo de carga es una corriente y la producida por la carga y descarga alternativa de una línea, debida a una tensión alterna, se llama corriente de carga de línea. La corriente de carga fluye en la línea de transmisión, incluso, cuando está el circuito abierto. Otro efecto a tener muy en cuenta es la influencia del suelo en la capacidad de la línea, debido a que su presencia modifica el campo eléctrico en la línea. Para obtener el valor de la capacitancia, al igual que en el caso anterior está determinada por la transposición de la línea y la disposición geométrica de los conductores, además de depender de la constante dieléctrica del medio, el radio del conductor (dado por las tablas de características del fabricante), y la distancia media geométrica mutua. Por otra parte, la tierra presenta una superficie equipotencial y por lo tanto influirá en la capacitancia por fase. Esto se puede explicar utilizando el concepto de "imágenes".

2.4.3. Representación de las Líneas

Una vez identificados los parámetros como se observó en la sección anterior por unidad de área, debemos ahora seccionar dichos parámetros por distancia de línea de transmisión debido a que cada línea tiene una caracterización diferente, aunque las líneas de transmisión regularmente operan con cargas trifásicas equilibradas. Aun si no están dispuestas de forma equilátera e incluso sin transposición, la influencia de la asimetría es pequeña y se consideran equilibradas. Por esta razón, se supondrá a la línea transpuesta, analizando el rendimiento de la línea en una base por fase.

Se empleará la siguiente notación, para distinguir los diferentes parámetros totales de la línea unidad de longitud:

$z = R + j\omega L$ = Impedancia en serie por unidad de longitud, por fase.

$y = G + j\omega C$ = Admitancia en derivación por unidad de longitud entre fase y neutro.

l : Longitud de la línea.

$Z = zl$: Impedancia total en serie, por fase.

$Y = yl$: Admitancia total en derivación, entre fase y neutro.

Típicamente las líneas de transmisión se clasifican principalmente por su longitud. Por lo

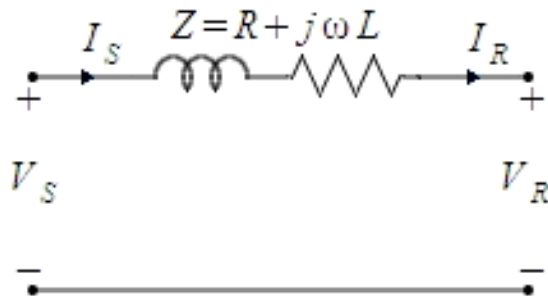
general, cada caso tiene su representación a los cuales se le hacen aproximaciones como se verán en representación a continuación:

2.4.3.1. Líneas de transmisión de longitud corta

Se consideran líneas cortas aquellas que son menores de 80 km de longitud. En este tipo de líneas se tiene que la susceptancia capacitiva total están pequeña que se puede despreciar. El circuito equivalente se representa por el circuito de la figura 10, donde son, respectivamente las corrientes en los extremos transmisor y receptor, y las tensiones entre fase y neutro en los mismos puntos.

Figura 10

Circuito equivalente de una línea corta



El circuito equivalente de la figura 10, ha sido simplificado, poniendo solamente la resistencia R y la reactancia inductiva L en serie que se representa como parámetros concentrados en lugar de uniformemente distribuidos a lo largo de la línea. Esto se sustenta en que no existe diferencia cuando se trata de medidas en los extremos de la línea, entre considerar parámetros concentrados o uniformemente distribuidos, siempre que se desprecie la admitancia en paralelo. Ya que la corriente en la línea es la misma en ambos casos.

2.4.3.2. Líneas de transmisión de longitud media

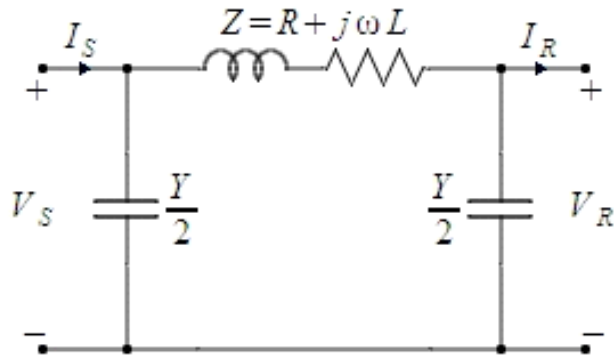
Se consideran líneas de longitud media aquellas que están comprendidas entre 80 km y 200 km. En este tipo de líneas se incluye la admitancia, que generalmente es de capacidad pura. Si la distribución de dicha capacidad es: La mitad está concentrada en cada extremo de la línea se dice que este circuito es nominal π , y si se supone concentrada en el punto medio del circuito que representa la línea y dos ramas series en ambos extremos con impedancias iguales, el circuito es nominal T. La anterior aproximación no conlleva a un error apreciable al calcular el valor de la tensión y la intensidad en los terminales. Los circuitos T y π se aproximan más entre sí y al circuito equivalente de la línea, cuando ésta se divide en dos o más secciones, cada una

representada por sus circuitos nominales T o en π . Los circuitos equivalentes se muestran en la figura 11.

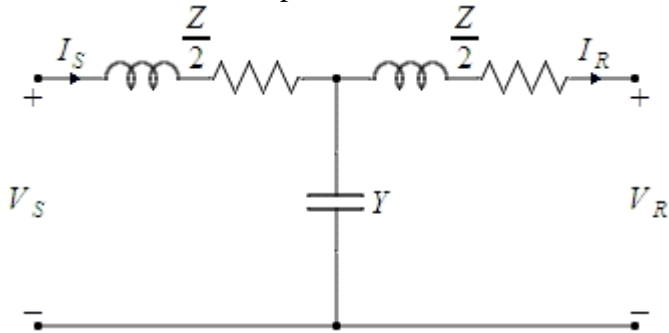
Figura 11

Circuito equivalente de una línea de longitud media

a. Circuito nominal tipo π



b. Circuito nominal tipo T

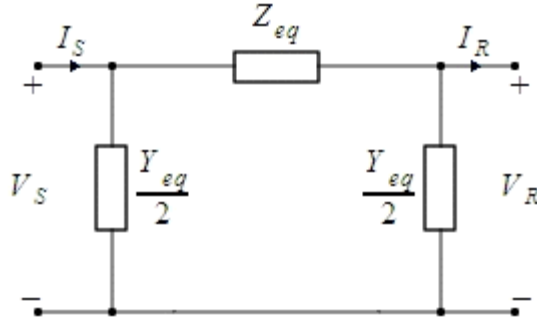


2.4.2.3. Líneas de transmisión de longitud larga

Se consideran líneas de longitud larga aquellas que tienen más de 200 km de longitud. En este caso, para un cálculo exacto la resistencia, la inductancia y capacidad deben estar uniformemente distribuidas a lo largo de la línea. El procedimiento para obtener el circuito equivalente no es el caso de estudio en este texto, sin embargo, se muestra en la figura 12 el circuito nominal π equivalente de una línea de transmisión. (también se puede utilizar un modelo nominal T).

Figura 12

Circuito equivalente tipo π de una línea de transmisión



Alternativamente, el modelo se podría representar por secciones en cascada de más pequeña longitud, con cada sección representada por un modelo nominal π o T equivalente

2.4.2. Modelamiento matemático y componente de retardo en transmisión

2.4.3. Modelo del Retardo

2.4.3.1. Modelo PADÉ

Las aproximaciones Padé son ampliamente usadas para aproximar tiempos muertos en sistemas de control continuo. Estas proporcionan una aproximación racional de dimensión finita de un tiempo muerto. Sin embargo, la aproximación de Padé estándar (recomendada en muchos libros de texto) con el mismo grado en el numerador y denominador, exhibe un salto en el tiempo $t=0$. Esto es altamente indeseable en la simulación de tiempos muertos. Para evitar este fenómeno, reconsideraremos la aproximación de Padé con diferentes grados en el numerador.

Hay muchos procesos físicos con tiempo muerto. Por ejemplo, virtualmente todos los procesos químicos implican un tiempo de retraso y todos los procesos de transporte también exhiben tiempos muertos. Sistemas de control con tiempos muertos son difíciles de analizar y simular. Una de las razones es que un sistema de control de lazo cerrado con tiempo muerto es de hecho un sistema dimensional infinito, es decir, el lazo cerrado tiene números de polos infinitos. Esto también dificulta determinar todos los polos del sistema. Uno de los remedios más ampliamente recomendados para superar esta dificultad es aproximar el tiempo muerto por algún método y analizar el sistema resultante [6,8]. La respuesta de paso de un tiempo

muerto es una señal de paso retrasada $h(t) = I(t-T)$, donde T indica el tiempo muerto. La Transformada de Laplace de $h(t) = I(t-T)$ es:

$$H(s) = e^{-sT} \quad (1)$$

Entre los muchos métodos de aproximaciones Padé los métodos más frecuentemente utilizados para aproximar un tiempo muerto por una función racional. En casi todos los libros de texto acerca de teoría clásica de sistemas de control proporciona la relación básica, pero por lo general sólo para una aproximación con igual grado en el numerador y denominador (trata, por ejemplo, la subrutina *pade.m* en MATLAB). La aproximación de Padé más recomendada es de segundo orden con igual grado en el numerador y denominador [6,8]:

$$e^{-sT} \approx R_{2,2}(s) = \frac{12 - 6(sT) + (sT)^2}{12 + 6(sT) + (sT)^2} \quad (2)$$

Es un poco desconcertante darse cuenta, que la respuesta de paso de esta aproximación (por ejemplo, la función de transferencia) presenta un salto en $t=0$, debido a la igualdad de grado en el numerador y el denominador. Es decir, en lugar de retrasar la señal de entrada aparecen una señal de salida en $t=0$. Esto parece ser bastante malo. Por otra parte, esta aproximación tiene buenas propiedades en el dominio de la frecuencia. Así que uno puede preguntarse: ¿es posible modificar la aproximación evitando el salto en $t=0$, pero manteniendo las propiedades del dominio de frecuencia?

2.4.3.1.1. Aproximaciones con Numerador Constante

Hay muchas maneras de aproximar e^{-sT} por una función racional. Considere, por ejemplo, la serie de Maclaurin [1,11]. Tomando sólo los primeros n -términos podemos definir la siguiente aproximación:

$$e^{-sT} \approx R_{0,n}(s) = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{(sT)^k}{k!}} = \frac{1}{1 + (sT) + (sT)^2 / 2! + (sT)^3 / 3! + \dots + (sT)^n / n!} \quad (3)$$

Esta fórmula se recomienda en Kuo [pp.183] y en Palm [pp.509]. Aunque la expresión parece natural para aplicar, surge una dificultad inesperada como se aumenta el grado de la aproximación. La función racional $R_{0,n}(s)$ exhibe polos en el semiplano de la derecha a medida que n aumenta, es decir, cuando $n > 4$! Aunque la precisión de la aproximación aumenta a medida que n aumenta en el dominio de la frecuencia, pero como una función de transferencia $R_{0,n}(s)$ se vuelve inestable. Este es un fenómeno poco conocido y hace a la aproximación aparentemente inútil para $n > 4$. Considere, por ejemplo, los 5 primeros términos (aproximación de 5to orden):

$$R_{0,5}(s) = \frac{120}{120 + 120s + 60s^2 + 20s^3 + 5s^4 + s^5} \quad (4)$$

Los polos de esta función racional son:

$$p_{1,2} = 0,23981 \pm i 3,12834;$$

$$p_{3,4} = -1,44180 \pm i 2,43452 \text{ y}$$

$$p_5 = -2,1806.$$

Puesto que hay dos polos complejos conjugados en el semiplano derecho, ¡Esta "aproximación" es inestable!

Otro método recomendado en algunos textos guía [8,13] se basa en la fórmula del producto infinito de la función exponencial [11]. Tomando sólo los primeros n términos en el producto nos lleva a la siguiente aproximación:

$$e^{-sT} \approx R_{0,n}(s) = \frac{P_n}{Q_n(s)} = \frac{1}{(1 + sT/n)^n} = \frac{n^n}{(n + sT)^n} \quad (5)$$

Esta aproximación tiene múltiples polos (con multiplicidad n) en $p_n = -n/T$. De hecho, la ecuación (5) da una aproximación bastante pobre para un bajo valor de n [13,14]. Sin entrar en más detalles, podemos concluir, estas aproximaciones simples (sin numerador dinámico) dan aproximaciones pobres de un tiempo muerto. Uno puede esperar mejorar la precisión con la elección de un numerador apropiado.

2.4.3.2. Modelo en el dominio de la frecuencia

2.4.3.2.1. Aproximación de Padé de e^{-sT}

Para determinar las funciones de transferencia de las aproximaciones de Padé con diferente grado en el numerador, uno simplemente sustituye $x = sT$ en (12) y (13). Por ejemplo, la aproximación de orden cuarto con tercer numerador orden puede expresarse como [14]:

$$R_{3,4}(s) = \frac{840 - 360sT + 60(sT)^2 - (sT)^3}{840 + 480sT + 120(sT)^2 + 16(sT)^3 + (sT)^4} \quad (14)$$

Tenga en cuenta, que el orden n de la aproximación de Padé tiene diferentes polinomios del denominador en función del grado del numerador. Es interesante determinar la configuración de polos y ceros de la aproximación. La Figura 1 muestra la configuración de polos y ceros de cuarto orden de la aproximación de Padé con diferente grado en el numerador. Tenga en cuenta, que todos los polos están en el semiplano izquierdo y todos los ceros están en el semiplano derecho del plano. Nótese, que los polos y ceros de la

aproximación de Padé $R_{4,4}(s)$ son simétricas con respecto al eje imaginario y están cerca de un círculo.

Debido a la configuración simétrica polo-cero, la fase de $R_{n,n}(s)$ va a $-2n\pi/2$ y su amplitud se mantiene constante en todas las frecuencias. Por otra parte, la respuesta de paso de $R_{n,n}(s)$ exhibe un salto en $t=0$ que no es muy deseable. Para evitar el salto en la respuesta de paso, se recomienda utilizar $R_{n-1,n}(s)$ en lugar de $R_{n,n}(s)$. En la Tabla 1 se dan las funciones de transferencia de ambos hasta 5to orden. Sin embargo, hay un precio a pagar: debido al menor grado numerador, la fase de $R_{n-1,n}(s)$ va a $-(m+n)\pi/2$ sólo y su amplitud tiende a cero a muy altas frecuencias. Pero en general, $R_{n-1,n}(s)$ parece ser un buen compromiso.

La figura 2 muestra la etapa de respuestas de $R_{n-1,n}(s)$ y $R_{n,n}(s)$. Uno puede ver fácilmente que $R_{n-1,n}(s)$ da una mejor aproximación en el dominio del tiempo [14], especialmente en el intervalo $[0, T]$. Como una medida del error que damos en la Tabla 2 los errores medios cuadrados definidos en el dominio del tiempo por:

$$I_{m,n} = \int_0^{\infty} \{1(t-T) - y_{m,n}(t)\}^2 dt \quad (15)$$

Figura 13.

Configuración de polos y ceros de cuarto orden de la Aproximación de Padé con diferente grado del numerador. Todos los polos están en el semiplano izquierdo y todos los ceros están en el semiplano derecho del plano.

(=R_{1,4}(s); x=R_{2,4}(s); R_{3,4}(s); 0=R_{4,4}(s))

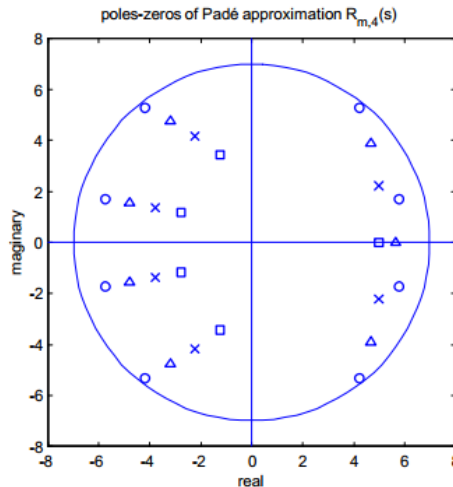


Tabla 2

Funciones de Transferencia $R_{n-1,n}(s)$ y $R_{n,n}(s)$ de las Aproximaciones de Padé.

n	$R_{n-1,n}(s)$	$R_{n,n}(s)$
1	$\frac{1}{1+sT}$	$\frac{2-sT}{2+sT}$
2	$\frac{6-2sT}{6+4sT+(sT)^2}$	$\frac{12-6sT+(sT)^2}{12+6sT+(sT)^2}$
3	$\frac{60-24sT+3(sT)^2}{60+36sT+9(sT)^2+(sT)^3}$	$\frac{120-60sT+12(sT)^2-(sT)^3}{120+60sT+12(sT)^2+(sT)^3}$
4	$\frac{840-360sT+60(sT)^2-(sT)^3}{840+480sT+120(sT)^2+16(sT)^3+(sT)^4}$	$\frac{1680-840sT+180(sT)^2-20(sT)^3+(sT)^4}{1680+840sT+180(sT)^2+20(sT)^3+(sT)^4}$
5	$\frac{15120-6720sT+1260(sT)^2-120(sT)^3+(sT)^4}{15120+8400sT+2100(sT)^2+300(sT)^3+25(sT)^4+(sT)^5}$	$\frac{30240-15120sT+3360(sT)^2-420(sT)^3+30(sT)^4-(sT)^5}{30240+15120sT+3360(sT)^2+420(sT)^3+30(sT)^4+(sT)^5}$

Figura 14

Respuesta de Paso de la Aproximación de Padé $R_{n-1,n}(s)$ y $R_{n,n}(s)$

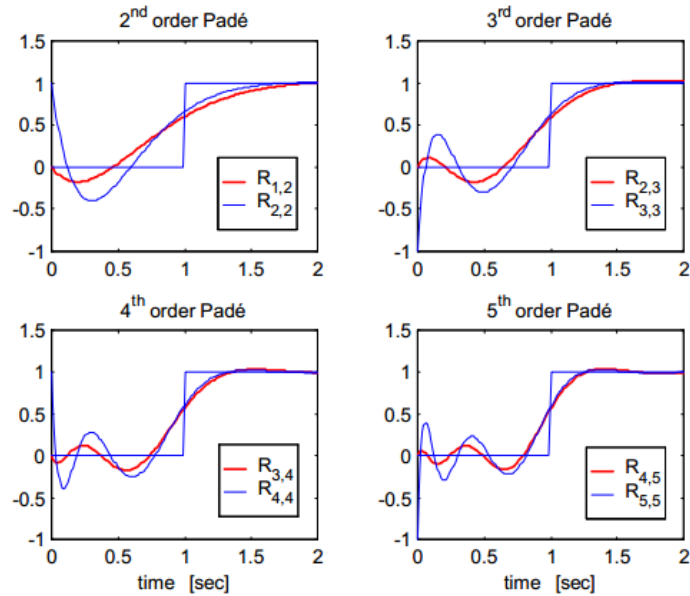


Tabla 3

Error medio cuadrático de las respuestas de paso de $R_{n-1,n}(s)$ y $R_{n,n}(s)$

n	$I_{n-1,n}$	$I_{n,n}$
1	0,235759	0,27067
2	0,106261	0,15424
3	0,069044	0,10701
4	0,051133	0,08162
5	0,040512	0,06583

Hemos considerado la aproximación de Padé general de un tiempo muerto con función de transferencia e^{-sT} . Los polinomios de las aproximaciones racionales se dan en forma analítica. El "estándar" aproximación de Padé $R_{n,n}(s)$ exhibe un salto en $t=0$ en su respuesta de paso. Para evitar este fenómeno se recomienda la aproximación Padé $R_{n-1,n}(s)$ donde el grado del numerador es uno menos que el del denominador. Esto da una mejor aproximación de la respuesta de paso. Aplicado en lazo cerrado, se diferencian debido a sus diferentes frecuencias características. Parece que hay un claro compromiso entre el uso de $R_{n,n}(s)$ o $R_{n-1,n}(s)$ dependiendo del rango de frecuencia. Uno tiene que darse cuenta que, mediante la aproximación de un tiempo muerto en sistemas de control, se introduce errores de modelado, que por lo tanto limita el ancho de banda alcanzable.

2.4.3.3. Aproximación de Padé en Matlab

Tal como se ha venido manejando el concepto del Modelo de la Aproximación de Padé anteriormente, también debíamos realizar su descripción para la función PADÉ en Matlab con el fin de observar los resultados simulados. En esta sección describimos como funciona dicha aproximación en el programa Matlab.

La función PADÉ aproxima retrasos para modelos racionales. Tales aproximaciones son útiles para modelar los efectos de retardo de tiempo, tales como retrasos de transporte y computación en el contexto de sistemas de tiempo continuos. La transformada de Laplace de un retardo de tiempo de T segundos es $\exp(-sT)$. Esta función de transferencia exponencial se aproxima por una función de transferencia racional utilizando fórmulas de aproximación de Padé.

Esta función devuelve la Aproximación de Padé de orden N del tiempo continuo de e^{-sT} en forma de función de transferencia.

El vector fila del Numerador (NUM) y del Denominador (DEN) contiene coeficientes polinomiales en orden descendente en potencias de s .

`[num, den] = padé (T, N)`

sysx = PADE (sys, N)
sysx = pade (sys, NU, NY, NINT)

Sintaxis:

[num, den] = pade (T, N)
sysx = PADE (sys, N)
sysx = pade (sys, NU, NY, NINT)

Cuando se invoca la función sin argumentos en la izquierda, pade(T,N) traza los pasos y respuestas de fase de orden N y los compara con las respuestas exactas del retardo de tiempo (Nota: la aproximación de Padé tiene una ganancia unitaria en todas las frecuencias).

[num, den] = pade (T, N)

Devuelve la aproximación Padé de orden N del retraso tiempo continuo de E/S $\exp(-sT)$ en forma de función de transferencia. El numerador vectores fila y el denominador contienen los coeficientes de numerador y denominador en potencias descendentes de S . Ambos son polinomios enésimo orden.

pade (T, N)

Aproximación de Padé que traza las respuestas a un escalón y de fase de la enésimo orden y las compara con las respuestas exactas del modelo de I / O de retardo T . Tenga en cuenta que la aproximación Padé tiene unidad de ganancia en todas las frecuencias.

sysx = pade (sys, N)

Produce una aproximación SYSX sin retrasos del sistema de retardo de tiempo continuo SYS mediante la sustitución de todos los retrasos por su enésimo orden de aproximación de Pade. El valor predeterminado es $N = 1$.

SYSX = pade (sys, NU, NY, NINT)

Especifica órdenes de aproximación independientes para cada entrada, salida y de E/S o retraso interno. Aquí NU, NY, y NINT son matrices de números enteros tal que:

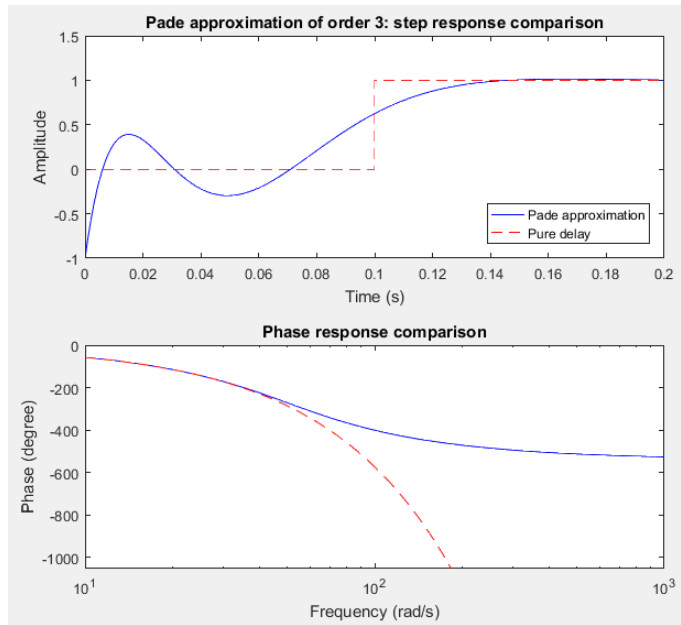
- NU es el vector de las órdenes de aproximación para el canal de entrada
- NY es el vector de las órdenes de aproximación para el canal de salida
- NINT es el orden de aproximación de los retrasos de E / S (modelos TF o ZPK) o retrasos internos (modelos de espacio de estado).

Se puede utilizar valores escalares para NU, NY, o NINT para especificar una orden de aproximación uniforme. También se puede establecer algunas entradas de NU, NY, o NINT para evitar aproximación de los retrasos correspondientes

Ejemplo: Aproximación de Padé de tercer orden

Calcule la aproximación Pade de tercer orden a 0.1 segundo de retraso I/O y compare el tiempo de respuesta y frecuencia del verdadero retraso y su aproximación.

pade(0.1,3)



Limitaciones

Aproximaciones Padé de orden superior producen funciones de transferencia con polos agrupados. Debido a que tales configuraciones de polos tienden a ser muy sensibles a las perturbaciones, aproximaciones de Padé con el orden $N > 10$ deben ser evitadas.

En el capítulo 4 observaremos como se implementan las aproximaciones de Padé para simular el retardo en las señales de estudio y como estas repercuten en la aplicación del modelo para implementar prácticas de control sobre los sistemas de potencia.

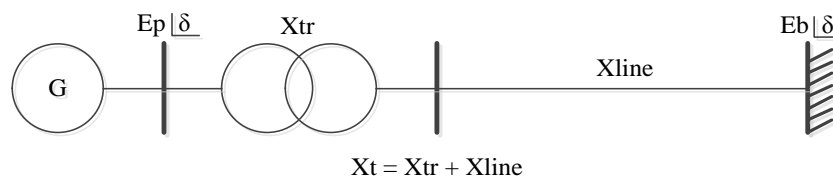
Modelamiento del Sistema SMIB (Single Machine Infinite Bus) con retardos en señales.

3.1. Modelamiento del Sistema SMIB.

Un generador conectado a un sistema de gran tamaño a través de una línea de transmisión puede ser reducido a un Sistema SMIB; por lo tanto, el sistema está representado por una máquina conectada a un sistema de bus infinito a través de una línea de transmisión (Figura 15).

Figura 15

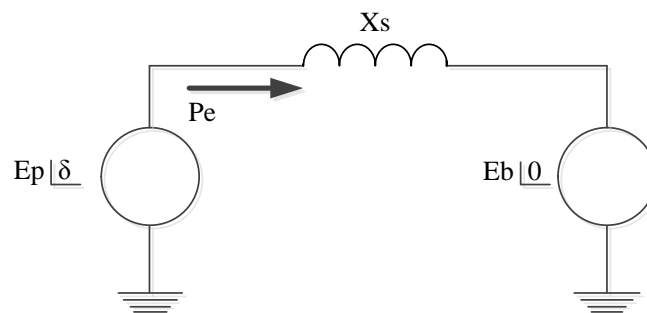
Máquina única en Barra Infinita (SMIB)



La máquina síncrona es representada para el modelo transitorio, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Circuito simplificado de la máquina síncrona.



La ecuación de oscilación, asumiendo que el efecto del viento, fricción y torque por pérdida de hierro son insignificantes, se refiere al torque de inercia con el torque de aceleración neta del rotor de la máquina síncrona como sigue [1] - [2]:

$$\frac{2H}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_m - \frac{E_p \cdot E_b}{X_t} \cdot \sin(\delta) \quad (1)$$

Donde ω_0 es la velocidad angular nominal en eléctrica, rad/s, P_m es la potencia mecánica, P_e es la potencia eléctrica, E_b es la tensión terminal, E_p es el voltaje de excitación, δ es el ángulo de potencia entre E_b y E_p , X_t es la reactancia equivalente entre la máquina y la barra infinita y H es una constante que participan en el valor de normalización de inercia. Exceptuando δ y ω_0 , todos los valores en (1) están dados en p.u.

Un modelo de estado se puede obtener a partir de (1) como:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{\omega_0}{2H} \cdot P_m - \frac{E_p \cdot E_b \cdot \omega_0}{2 \cdot X_t \cdot H} \cdot \sin(\delta) = a \cdot u - C_f \cdot \sin(\delta) \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} a &= \frac{\omega_0}{2H}; \\ C_f &= \frac{E_p \cdot E_b \cdot \omega_0}{2 \cdot X_t \cdot H}; \quad u = P_m \end{aligned} \quad (2)$$

Este modelo no es lineal ni amortiguado donde la potencia mecánica en p.u. es la señal de entrada, y el ángulo de la máquina es la señal de salida. En (2), δ es una variable de estado para el problema.

3.2. Sistema SMIB con señales retardadas.

3.2.1. Ecuaciones diferenciales retardadas.

El comportamiento transitorio de sistemas de energía eléctrica se describe tradicionalmente a través de un conjunto de Ecuaciones Diferenciales Algebraicas (DAE, por sus siglas en ingles) de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, y, u) \\ 0 &= g(x, y, u)\end{aligned}\quad (1)$$

Donde $f(f : \mathbb{R}^{n+m+p} \rightarrow \mathbb{R}^n)$ son las ecuaciones diferenciales, $g(g : \mathbb{R}^{n+m+p} \rightarrow \mathbb{R}^m)$ son las ecuaciones algebraicas, $x(x \in \mathbb{R}^n)$ son las variables de estado, $y(y \in \mathbb{R}^m)$ son las variables algebraicas, y $u(u \in \mathbb{R}^p)$ son variables discretas modelando eventos, por ejemplo, cortes de línea y fallos.

En la práctica común, (1) se divide en un conjunto de subsistemas donde las variables discretas u se sustituye por las reglas *si-entonces*. Por lo tanto, (1) puede ser convenientemente reescrito como una colección finita de continuas DAEs, uno por cada cambio de variable discreta. Un sistema de este tipo también se conoce como *autómata híbrido* o *sistema dinámico híbrido*.

A pesar del hecho de que (1) son bien aceptados y son la opción común en los paquetes de software de sistemas de potencia, algunos aspectos de la realidad están ausentes de esta formulación, por ejemplo, procesos estocásticos y las variables de relaciones funcionales. En esta sección, estamos interesados en la definición de los posibles efectos sobre la estabilidad de los retardos de tiempo. La introducción de retardos de tiempo en (1) cambia el DAE en un conjunto de Ecuaciones Algebraicas Diferenciales de Retardo (DDAE, por sus siglas en ingles). En aras de la simplicidad, sólo se tendrán en cuenta los retardos de tiempo constantes ideales en la forma:

$$Y_d = y(t - \tau) \quad (2)$$

Donde Y_d es el retardo o variable retrasada con respecto a alguna variable algebraicas y , t es el tiempo de simulación actual, y $\tau(\tau > 0)$ es el retardo constante. Una expresión similar con la notación obvia, puede ser escrita en caso de que el retardo afecte a una variable de estado:

$$X_d = X(t - \tau) \quad (3)$$

Fusionando (1), (2) y (3) nos lleva a:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, y, X_d, Y_d, u) \\ 0 &= g(x, y, X_d, Y_d, u)\end{aligned}\quad (4)$$

Las ecuaciones (4) son la forma más general de DDAE no lineal. Sin embargo, para los modelos prácticos de los sistemas físicos, algunas simplificaciones pueden ser

adoptadas. En particular, como se muestra en la Sección III, el índice-1 la forma de Hessenberg es adecuada para modelar sistemas de potencia:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y, Xd, Yd, u) \\ 0 &= g(x, y, Xd, u) \end{aligned} \quad (5)$$

que es una simplificación de (4). El índice-1 la forma de Hessenberg (5) se utiliza en el resto del documento.

3.2.2. Diagrama de Bloques.

Las redes de comunicación son modeladas como sistemas de retardo de tiempo, debido a los retrasos inherentes de propagación. Estos retrasos son cruciales para la estabilidad del sistema, y pueden ser modelados matemáticamente en el dominio de la frecuencia, como:

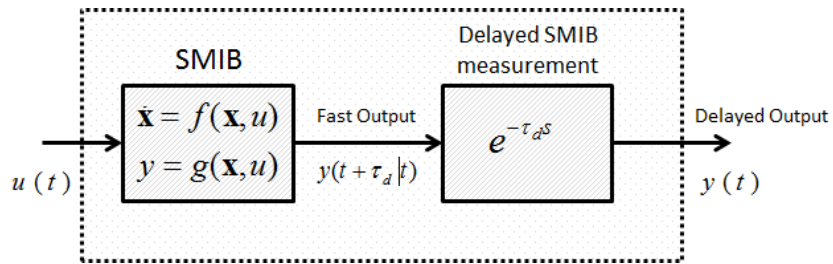
$$f(t) \leftrightarrow F(s)$$

$$f(t - \tau_d) \leftrightarrow e^{-\tau_d s} F(s) \quad (6)$$

En la Fig. 3, la señal de salida en el sistema SMIB, y la señal $y(t + \tau_d | t)$, es llamada salida rápida; es decir, la potencia eléctrica transferida al bus infinito. A continuación, se mide la potencia eléctrica y se envía a través del sistema de comunicaciones al centro de control, situado en el bus generador. Esta señal medida llega con un retraso τ_d (señal retardada), que se considera constante en los cálculos. La señal en el centro de control, la salida retardada, se denomina $y(t) = y(t)$.

Fig. 17

Esquema SMIB retrasado.

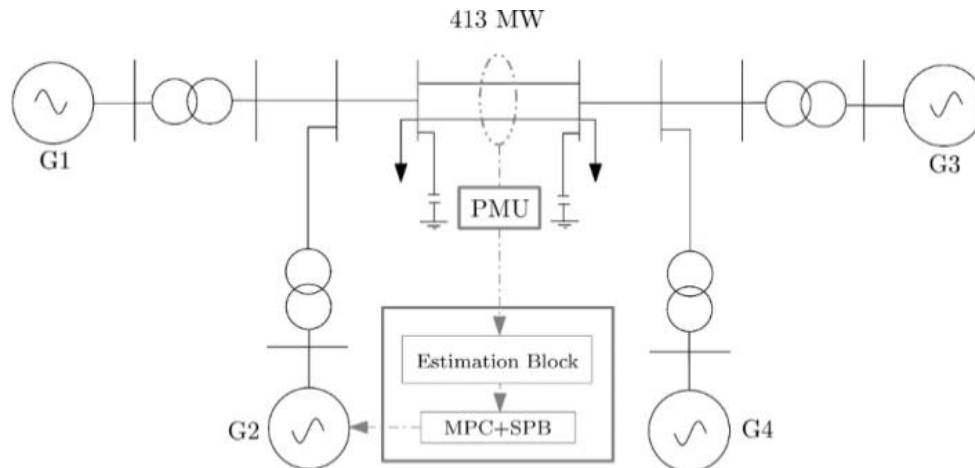


Resultados y Simulaciones

Para efectuar las simulaciones se tuvo en cuenta el modelo Kundur de prueba que usualmente se emplean en el control de sistemas de potencia y que reflejan fielmente el comportamiento de los sistemas dinámicos con problemas de estabilidad.

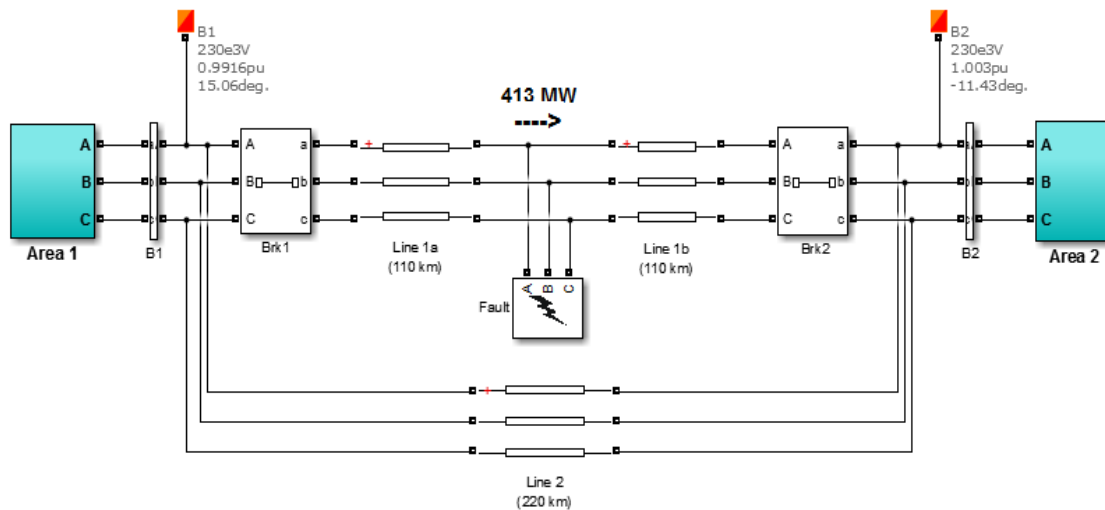
El sistema Kundur lo componen 4 máquinas eléctricas controladas localmente mediante PSS's. Así mismo, éste sistema integra éstas 4 máquinas mediante la conformación de dos áreas de generación que se interconectan mediante dos tie lines o líneas de transferencia. La siguiente figura ilustra el sistema Kundur.

Fig. 18
Sistema Kundur.



La implementación tiene la forma que se ilustra en la figura siguiente:

Fig. 19
Sistema Kundur por Matlab®.



La implementación se definió usar en Matlab puesto que contiene información relacionada con el sistema de potencia de características realistas con la implementación de sus esquemas de control de gobernadores y elementos AVR. Por otro lado, de ésta forma se podían implementar diferentes estrategias de control que permitían el abordaje de los problemas derivados de las señales retardadas.

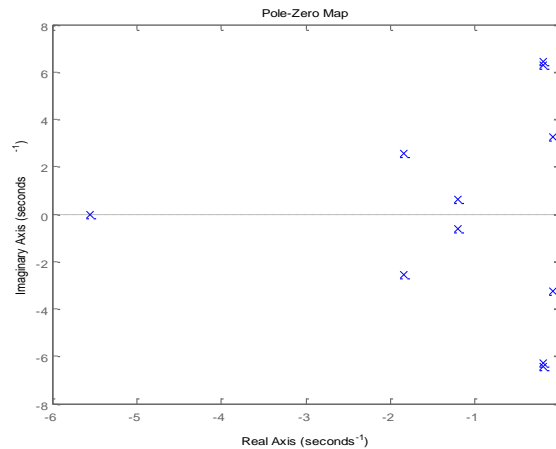
Del anterior sistema puede verse el comportamiento en estado estacionario sin fallas y sin problema alguno. Así puede verse las condiciones iniciales.

Tipo Máquina	de	Tipo de nodo	Descripción	Tensión		Potencia activa	Potencia reactiva	NOMre Elemento
SM		PV	M1_Area1	20.00	1	700.00	0.00	Area 1/M1 900 MVA
SM		swing	M2_Area1	20.00	1	0.00	0.00	Area 1/M2 900 MVA
SM		PV	M3_Area2	20.00	1	719.00	0.00	Area 2/M3 900 MVA
SM		PV	M4_Area2	20.00	1	700.00	0.00	Area 2/M4 900 MVA
RLC load		Z	B2	230.00	1	0.00	-350.00	Area 2/- 350MVAR

RLC load	Z	B2	230.00	1	1767.00	-87.00	Area 2/1767MW 100MVAR - 187MVAR
RLC load	Z	B1	230.00	1	0.00	-200.00	Area 1/- 200MVAR
RLC load	Z	B1	230.00	1	967.00	-87.00	Area 1/967MW 100MVAR - 187MVAR
Bus	-	*1*	100.00	1	0.00	0.00	Line 1a (110 km)
Bus	-	*2*	100.00	1	0.00	0.00	Line 1b (110 km)
Bus	-	*3*	230.00	1	0.00	0.00	Area 1/T1: 900MVA 20 kV- 230 kV
Bus	-	*4*	230.00	1	0.00	0.00	Area 1/T2: 900MVA 20 kV//230 kV
Bus	-	*5*	100.00	1	0.00	0.00	Line 1b (110 km)
Bus	-	*6*	230.00	1	0.00	0.00	Area 2/T3: 900MVA 20 kV- 230 kV
Bus	-	*7*	230.00	1	0.00	0.00	Area 2/T4: 900MVA 20 kV//230 kV

El diagrama de polos simplificado del sistema es como se muestra en la figura siguiente:

Fig. 20
Diagrama de Polos del sistema Kundur.

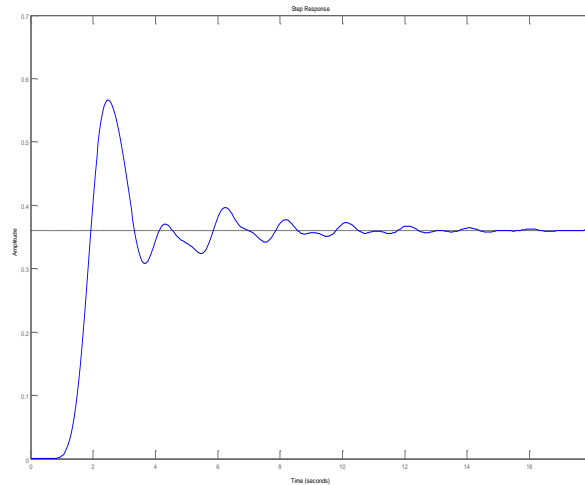


4.1. Sistema Kundur sin retardos.

Lo primero que se analiza es el comportamiento del sistema Kundur sin retardos. Aquí se obtiene el comportamiento frente a un cambio de referencia en la señal de potencia que se transmite por las líneas que conectan a las dos áreas.

Puede verse que si bien al principio se presentan ciertas oscilaciones y sobreimpulsos, el comportamiento final de la señal es estable y logra imponerse la estabilidad al poco tiempo del cambio exigido sobre el sistema. Lo que se describe es reflejo del comportamiento de los polos, dado que los polos muestran estabilidad del sistema.

Fig. 21
Comportamiento de la potencia transferida.



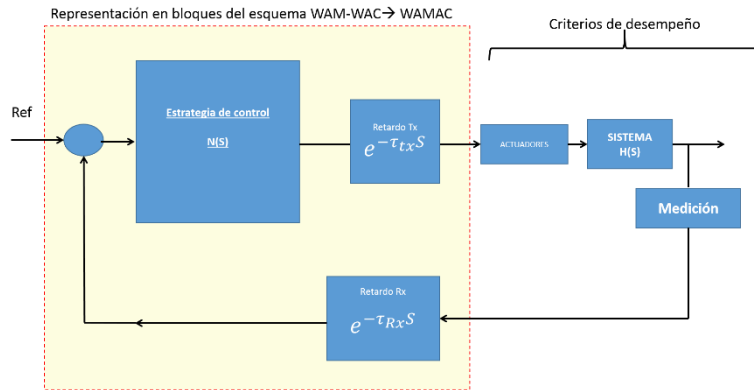
En la anterior gráfica el estado estacionario se alcanza en 6 segundos después de haberse efectuado el cambio de referencia. También es posible verse que existen unas pequeñas oscilaciones que no hacen perder la estabilidad.

4.2. Sistema Kundur con retardos.

Se analiza el comportamiento de la inclusión de los retardos en el sistema de potencia de Kundur, para esto se tuvo en cuenta que podían presentarse retardos en las mediciones pero que también podían presentarse retardos en el envío de las señales desde el esquema de control hasta el dispositivo que se accionaba. Para efectos de análisis se implementó lo que se ilustra en la figura siguiente, que no es más que el reflejo de la inclusión en lazo cerrado de los retardos.

Ese esquema es la guía para el análisis que también incluye la forma de obtener la función de transferencia en lazo cerrado para el caso específico de un sistema de potencia.

Fig. 22
Esquema de lazo cerrado.



Este sistema en lazo cerrado permite obtener una función de transferencia como la que se ilustra a continuación, y cabe mencionar que en tal función de transferencia puede verse cómo los polos pueden variar. Es decir, a pesar que no se hayan incluido los efectos del retardo en la función original, es cierto que los efectos se vinculan cuando se efectúa control con estrategias de lazo cerrado como las mencionadas.

$$H_{lc}(s) = \frac{N(s)H(s) e^{-\tau_{Rx}S}}{N(s)H(s) + e^{-(\tau_{Rx} + \tau_{Tx})S}} \quad (1)$$

Nótese también que la inclusión de los retardos en la ecuación objeto de análisis se refleja en el cambio de los polos, y al recordar lo analizado en la expresión de Padé puede encontrarse polos de distintos valores y diferentes características que pueden ocasionar un comportamiento inestable de las señales, esto es el objeto de la tesis de grado.

4.2.1. Variaciones en los retardos de las señales medidas.

Las primeras simulaciones ejecutadas consisten en la inclusión de tiempo de retardo en las señales medidas por los aparatos PMU. Esto corresponde a la existencia de un tiempo de recepción que se ha denominado Rx.

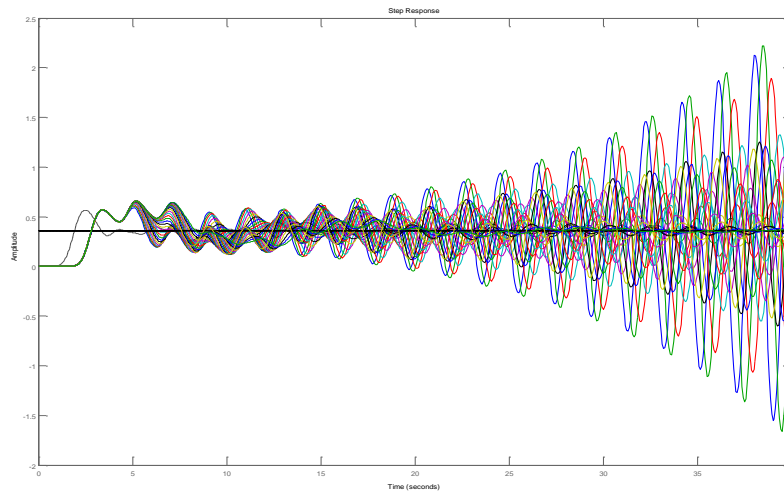
Ahora, tales retardos de los tiempos de recepción vienen dados por el factor de retardo descrito en los capítulos anteriores. En el caso particular del sistema de Kundur se implementaron los tiempos de retardo que nos entregan la siguiente tabla.

Communication Link	Associated Delay (ms)
Fiber-Optic cables	100 - 150
Microwave Links	100 - 150

Power line carrier (PLC)	150 – 350
Telephone lines	200 – 300
Satellite link	500 - 700

Se definió usar retardos de valores más grandes y teniendo en cuenta la referencia de los valores de las tablas. Los resultados obtenidos de las simulaciones de esas variaciones se muestran en la figura siguiente:

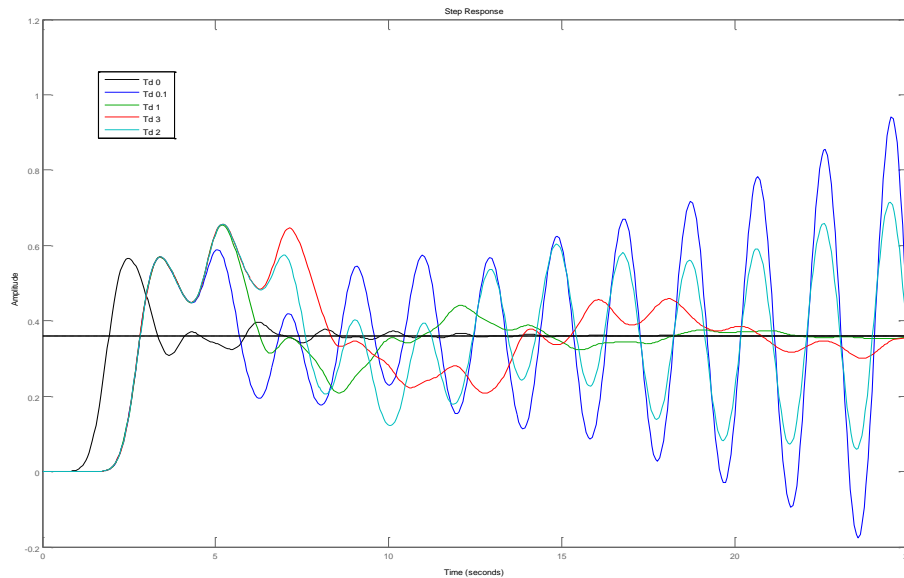
Fig. 23
Comportamiento de las señales con retardo en la medición.



De la gráfica de espigas anterior puede verse la forma en la que la variación de las señales medidas puede o bien hacer que los sistemas funcionen de manera estable o bien pueden hacer que se inestabilicen. En la figura siguiente, se ilustran tan solo algunos casos en los que puede verse la manera en la que influyen los retardos en sistemas de potencia en la estabilidad de los mismos.

Fig. 24

Comportamiento de las señales con retardo en la medición de algunos casos.

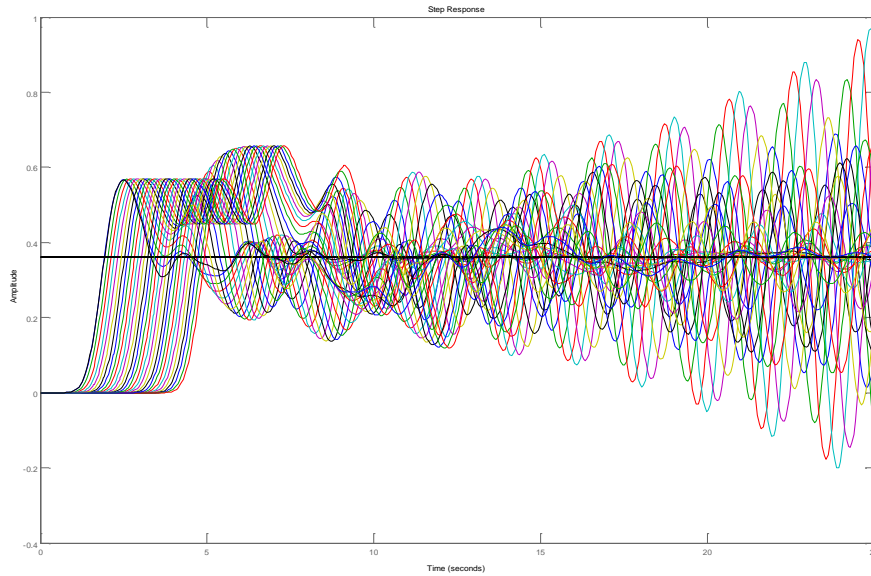


Aquí puede verse cómo si bien algunos valores de retardos inestabilizan el sistema, existen otros valores que no llevan el sistema en lazo cerrado a la inestabilidad. Este es un resultado contra intuitivo pues siempre se afirmaba que las mayores posibilidades de afectación era generando inestabilidad. Es decir, aún a pesar del retardo en las señales es posible lograr señales controladas y estables.

4.2.2. Variaciones en los retardos de señales de control.

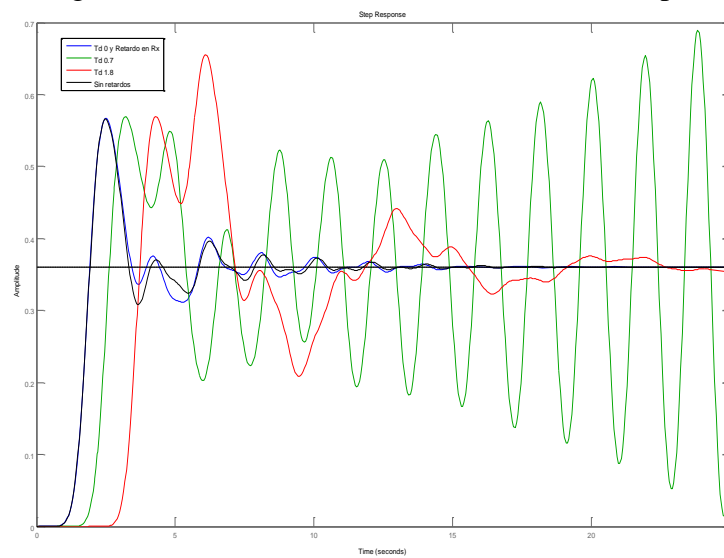
Ahora en éste caso implementamos las señales de retardo pero en el proceso de control, es decir, se implementa el retardo en la variable tx de transmisión ilustrada anteriormente y reflejada en la figura 23. Ahora, en la siguiente figura 25 se presenta la espiga correspondiente a éste caso.

Fig. 25
Comportamiento de las señales con retardo en la medición.



A éste respecto valga la pena decir que se encuentra un comportamiento similar que al del caso anterior, es decir: las variaciones en las señales obtenidas pueden ser tanto estables como inestables dependientes del modelo de la planta. Para fijar mejor nuestra atención sobre algunos casos específicos tomaremos en cuenta el comportamiento de las señales solamente en algunos casos:

Fig. 26
Comportamiento de algunos casos con retardo en las señales usadas para controlar.



En esta figura es evidente, nuevamente, que aunque existen tiempos de retardo que hacen que las señales sean inestables, pues también existen tiempos de retardo que logran conseguir estabilidad en lazo cerrado. Sin embargo, cabe anotar que los retardos en todo caso constituyen un riesgo del incremento en los niveles de inestabilidad de estrategias de lazo cerrado.

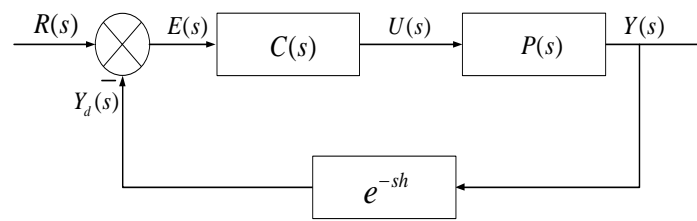
4.3. Propuesta de control con predictor para señales con retardo en la medición.

Aunque no hacía parte del objetivo general o específico del trabajo de grado, se ha logrado descubrir que para mitigar el efecto nocivo de los retardos en sistemas de potencia es posible incluir el predictor de Smith.

Partimos de la existencia de un modelo SMIB como el descrito en las secciones anteriores. Una vez definido el modelo, se procede a observar el comportamiento cuando la señal de realimentación va con un retardo asociado, este esquema se presenta en el siguiente diagrama de bloques:

Fig. 27

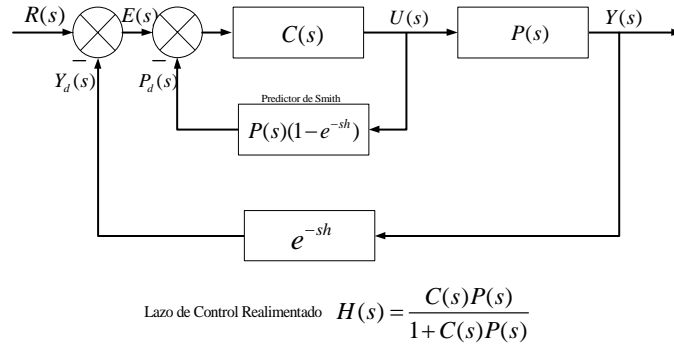
Sistema SMIB con retardos.



$$\text{Lazo de Control Realimentado } H(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)e^{-sh}}$$

Como se observa el bloque $C(s)$ es el controlador diseñado para el caso sin retardo, mientras que $P(s)$ es la planta la cual es nuestro sistema linealizado e invariante en el tiempo, por último la función de transferencia del retardo e^{-sh} donde $h=1.5$ segundos, al implementar este modelo, incluyendo el retardo, en MATLAB. Cuando se implementa bajo una estructura diferente, implementado el predictor de Smith, el diagrama de bloques se define como:

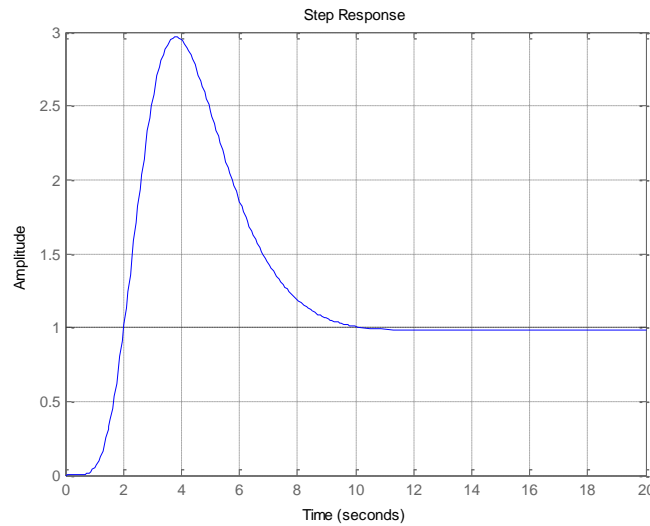
Fig. 27
Sistema SMIB con retardos y predictor de Smith.



Es importante resaltar que debido a la implementación del predictor, cuando se realizan las operaciones entre los bloques, la expresión exponencial de retardo desaparece de la ecuación característica, esto implica que se está trabajando, básicamente con polinomios y las ecuaciones son algebraicas, a diferencia del caso cuando no se implementa el predictor.

La respuesta al escalón, del sistema de potencia con su controlador es:

Fig. 28
Respuesta del sistema SMIB.



Evidentemente el cambio indica que el predictor tiene un comportamiento deseable en plantas donde existe un retardo en la comunicación de la señal de realimentación, en general, es una estrategia importante para sistemas con retardos en la salida o en la entrada.

El predictor tiene en cuenta el comportamiento de la planta sin retardo, y la diferencia respecto a la planta con retardo, con la diferencia tomada en cuenta, el controlador considera la ley de control adecuada y retrasa o adelanta esta señal de acuerdo al comportamiento de la planta.

Consideraciones Finales

5.1. Conclusiones.

Los trabajos que versan sobre el tema de los retardos en los sistemas WAMCS no han incluido de forma rigurosa los tiempos empleados en la ejecución de la estrategia de control. Así mismo, tales trabajos no han profundizado casos de estudios con múltiples máquinas donde el tiempo de retardo del conjunto debe adaptarse a la señal con más retardo tanto en señal de control como en señal de medición.

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 y se ha verificado con los resultados propios y con los resultados de Venayagamoorthy et al.

El modelamiento de los retardos debe incluir tanto los tiempos constantes debido a las tecnologías como el comportamiento aleatorio, poco estudiado, de la dependencia con variables atmosféricas y otras dependencias.

La aproximación de orden 7 polinomial para el retardo si bien permite ajustar y obtener mejores simulaciones, puede no recrear fielmente el fenómeno en la realidad.

El predictor de Smith resulta ser una estrategia importante en el desarrollo de controladores para plantas con retardos, el predictor permite conocer el comportamiento de la planta con el retardo asociado y lo tiene en cuenta para que la ley de control sea aplicada en el momento adecuado.

Considerar la estabilidad de un sistema con retardos implica métodos matemáticos basados en la teoría clásica de Lyapunov, sistemas variantes en el tiempo y ecuaciones diferenciales con retraso, esto en sí mismo presenta una complejidad matemática interesante, si se logra trabajar en metodologías que demuestren estabilidad de estos sistemas, el diseño de controladores sería un resultado importante para estos sistemas.

5.2. Futuras líneas de trabajo.

Como trabajo futuro deberá implementarse controladores sobre sistemas de potencia de mayor tamaño. Por otro lado es necesario tener en cuenta que en algunos sistemas el análisis de la función de transferencia es complicado, por lo que se deberán buscar metodologías de análisis basadas en el modelo linealizado.

Bibliografía

- [1] Rene Avila Rosales, Jay Giri. “Wide Area Monitoring and Control for Power System Grid Security”. AREVA T&D Inc. Bellevue, WA, USA. August 2005.
- [2] Aranya Chakraborty. “Wide Area Monitoring & Control of Large Power Grids Using Synchrophasors”. North Carolina State University. SAMSI Smart Grid Workshop. October, 2011.
- [3] Yusheng Xue, “Some Viewpoints and Experiences on Wide Area Measurement Systems and Wide Area Control Systems”. 2008 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol.1, pp.78-83.
- [4] C. Martinez, M. Parashar, J. Dyer, J. Coroas. “Phasor Data Requirements for Real Time Wide-Area Monitoring, Control and Protection Applications”. EIPP White Paper- Final Draft, January 16, 2005.
- [5] Deyu Cai “Wide Area Monitoring, Protection and Control in the Future Great Britain Power System”.. University of Manchester. Tesis Doctoral, año 2012.
- [6] B. Naduvathuparambil, M. C. Valenti, and A. Feliachi, “Communication delays in wide area measurement systems,” Procs. of the Thirty-Fourth South-eastern Symposium on System Theory, Noviembre 2002.
- [7] Q.-C. Zhong, “Robust Control of Time Delay Systems” Springer Ed., pp 17-43 2006.
- [8] Ray, S.; Venayagamoorthy, G.K., "Real-time implementation of a measurement-based adaptive wide-area control system considering

- communication delays," *Journal of IET Generation, Transmission & Distribution*, vol.2, no.1, Enero 2008.
- [9] XM, "Proyecto Sistema de Respaldo Nacional ante Eventos de Gran Magnitud SIRENA", Seminario de Oscilaciones, Medellín. Julio de 2010.
- [10] Wenxia Liu; Hong Luo; Shangyuan Li; Dandan Gao, "Investigation and Modeling of Communication Delays in Wide Area Measurement System," *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) 2012* March 2012.
- [11] P. Data and T. Opal-rt, "WIDE AREA MEASUREMENTS FOR POWER SYSTEM STABILITY," Tesis Doctoral. Universidad de Manchester. pp. 52–61. 2011.
- [12] J. H. Chow, G. E. Boukarim y A. Murdoch, «Power System Stabilizers as Undergraduate Control Design Projects,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 144-151, 2004
- [13] L. Mirkin y Z. J. Palmor, «Control Issues in Systems with Loop Delays,» 2005.
- [14] M. E. Aboul-Ela, A. Sallam, J. D. McCalley y A. Fouad, «Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, pp. 767-773, 1996.
- [15] R. Majumder, B. Chaudhuri, B. C. Pal y Q. C. Zhong, «A Unified Smith Predictor Approach for Power System Damping Control Design Using Remote Signals,» *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, pp. 1063-1068, 2005.